



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

VÝVOJ PROGRESIVNÍHO KOTEVNÍHO  
MATERIÁLU NA POLYMERNÍ BÁZI

DEVELOPMENT OF PROGRESSIVE POLYMER ANCHOR MATERIAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Žlebek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA,  
CSc., MBA

BRNO 2017



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
PRACOVISŤE	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Tomáš Žlebek
NÁZEV	Vývoj progresivního kotevního materiálu na polymerní bázi
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- [1] BARNAT, J.: Analýza chování ocelových lepených kotev. Ph.D.Thesis, Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, Brno, 2010.
- [2] YILMAZ, S., MUHAMMET, A.O., YARDIM, Y.: Tensile behavior of post-installed chemical anchors embedded to low strength concrete. Construction and Building Materials 47, 2013, pp. 861-866.
- [3] COOK, R.A., DOERR, G.T., KLINGNER, R.E.: Bond stress model for design of adhesive anchors. Structural Journal 90 (5), pp.514-524, 1993.
- [5] Normy a předpisy zabývající se zkoušením kotvicích hmot a příslušné normy uvádějící požadavky na kotvicí hmoty.
- [6] Další vědecké a odborné publikace zabývající se experimentálním zkoušením polymerních kotvicích hmot.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Hlavním cílem diplomové práce je vyvinout progresivní kotevní polymerní materiál, který bude určen pro rychlé lepení kotev zejména do vysoko pevnostních betonů. Požadována bude dobrá dlouhodobá odolnost vyšším teplotám. Záměrem je vývoj kvalitního materiálu vynikajícího poměrem mezi rychlostí aplikace a nárůstem pevností, vysokou chemickou odolností, vysokou houževnatostí a zejména minimálním smrštěním do betonových podlah. Dílčím cílem práce bude prozkoumání možnosti využití některých typů speciálně upravených druhotných surovin a progresivních nanoplňiv, jako jsou dispergované uhlíkové nanotrubičky, přičemž z těchto plniv budou na základě pokročilého laboratorního testování vybrány ty nejvhodnější.

1. V teoretické části zpracujte doposud získané poznatky z oblasti polymerních kotvicích hmot, zaměřte se na rozdělení hmot dle pojivové báze a uveďte možnosti využití druhotných surovin jako plniv. Uveďte požadavky na kotvicí hmoty a postupy jejich zkoušení.
2. Vypracujte metodiku zkoušení progresivního kotevního materiálu na polymerní bázi. V návaznosti na identifikaci prostředí využití kotevních hmot optimalizujte vstupní suroviny (plniva a polymerní pojiva) a navrhnete základní receptury.
3. Dle navržené metodiky zkoušení polymerních kotvicích hmot experimentálně proveďte navržené receptury. Na základě vyhodnocení a optimalizace výsledků budou nejlepší receptury podrobeny pokročilemu zkoušení.
4. Proveďte optimalizaci výsledků pokročilého testování a vyberte nejúspěšnější receptury vč. porovnání vyvinutých progresivních kotvicích materiálů s jinými v současnosti využívanými v praxi.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Vedoucí diplomové práce

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na vývoj nového progresivního kotevního materiálu na polymerní bázi. Dnes je ve stavebnictví snaha využívat co nejvíce druhotné suroviny jednak z ekologického hlediska za účelem úspory primárních zdrojů a omezování vzniku odpadů a také z důvodů ekonomických. Proto je snahou využít v tomto kotevním materiálu co největší množství vhodných a vhodně upravených druhotných surovin. Hlavním cílem této práce je vývoj vysoce kvalitního kotevního materiálu vynikajícího poměrem mezi rychlostí aplikace a nárůstem pevností, vysokou chemickou odolností, tepelnou odolností a zejména minimálním smrštěním. Tato nová hmota najde uplatnění především při kotvení stavebních konstrukcí, těžkých strojů, bariér a dalších ocelových prvků.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Polymerní kotvící hmota, odpadní sklo, druhotné suroviny, epoxidová pryskyřice, požadavky, optimalizace, základní zkoušky, pokročilé zkoušky, zkouška vytržení, zpracovatelnost.

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with development of a new progressive anchor material on the polymer base. Nowadays, it is effort to utilize secondary raw materials in building industry as much as possible both from an environmental aspects in order to save primary energy sources and the reduction of waste and also due to economic reasons. Therefore, there is an effort to utilize high amount of suitable and appropriately treated secondary raw materials into the anchor materials. The main aim of this work is to develop high quality anchor material characterized by excellent ratio between speed and strength growth, high chemical resistance, thermal resistance and particularly minimal shrinkage. This new material is designed especially for anchoring building structures heavy machines steel barriers and other elements.

## KEYWORDS

Polymer anchor, waste glass, secondary raw materials, epoxy resin, requirements, optimalization, basic tests, advanced tests, pull-out test, potlife.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Tomáš Žlebek. *Vývoj progresivního kotevního materiálu na polymerní bázi*. Brno, 2017. 119 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2017

---

Bc. Tomáš Žlebek  
autor práce

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval prof. Ing. Rostislavu Drochytkoví, CSc., MBA, jako vedoucímu mé diplomové práce, za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky. Zároveň bych chtěl také poděkovat Ing. Jakubovi Hodulovi za jeho obrovskou ochotu, odborný přístup a čas strávený konzultacemi.

Diplomová práce byla vytvořena v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I" a projektu "TA04010425 - Komplexní systém speciálních správkových hmot s využitím druhotných surovin pro průmyslové provozy" podporovaného Technologickou agenturou ČR.

# OBSAH

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
2.1 Možnosti využití polymerních kotevních materiálů .....	13
2.2 Druhy podkladních materiálů .....	13
2.3 Způsoby kotvení v různých materiálech .....	14
2.4 Důležité faktory zohledňující výběr kotvicí hmoty .....	14
2.5 Druhy zatížení .....	15
2.6 Faktory ovlivňující dobu zpracování .....	15
2.7 Aplikace kotvicích hmot .....	15
2.7.1 Postup při aplikaci polymerních kotvicích hmot .....	16
2.8 Požadavky na kotvicí hmoty na polymerní bázi .....	16
2.9 Výrobci polymerních kotvicích hmot v České republice .....	17
2.10 Výrobci polymerních kotvicích hmot v zahraničí .....	18
2.11 Základní rozdělení polymerních kotvicích hmot .....	19
2.11.1 Polymerní kotevní hmota na bázi polyesterové pryskyřice .....	19
2.11.2 Polymerní kotvicí hmota na bázi epoxidové pryskyřice (EP) .....	21
2.11.3 Polymerní kotvicí hmota na bázi vinylesterové pryskyřice .....	23
2.11.4 Polymerní kotvicí hmota na bázi epoxy-akrylátů .....	24
2.11.5 Polymerní kotvicí hmota na bázi metakrylátů .....	24
2.11.6 Polymerní kotvicí hmota na bázi polyuretanové pryskyřice .....	24
2.12 PLNIVA .....	25
2.12.1 Primární suroviny .....	26
2.12.2 Druhotné suroviny .....	27
2.12.3 Rozptýlená výztuž .....	30
2.13 Zkoušení a hodnocení kotvicích hmot dle současných požadavků a norem .....	30
2.13.1 Požadavky na kotvicí hmoty .....	31
2.13.1.1 Zkoušení chemické odolnosti .....	33
2.13.2 Legislativní předpisy pro používání odpadů do výroby .....	33



<b>3 CÍL PRÁCE.....</b>	<b>34</b>
<b>4 METODIKA PRÁCE .....</b>	<b>34</b>
4.1 Etapa I – Identifikace vstupních surovin .....	34
4.2 Etapa II – Návrh receptur kotevní hmoty vycházející z jejich budoucí aplikace .....	35
4.3 Etapa III – Návrh metodiky zkoušení polymerních kotvících hmot .....	36
4.4 Etapa IV – Experimentální prověření navržených receptur .....	37
4.5 Etapa V – Optimalizace výsledků pokročilého zkoušení s následným provedením poloprovozního ověření a porovnáním vlastností s dosud používanými kotvícími hmotami .....	38
<b>5 PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>39</b>
5.1 ETAPA I – Identifikace vstupních surovin .....	39
5.1.1 Plnivo.....	39
5.1.1.1 Primární suroviny .....	39
5.1.1.2 Druhotné suroviny: .....	40
5.1.2 Rozptýlená nanovýztuž: .....	45
5.1.3 Polymerní pojiva: .....	45
5.2 ETAPA II – Návrh receptur kotevní hmoty vycházející z jejich budoucí aplikace ....	47
5.2.1 Požadavky na vlastnosti kotevní hmoty .....	47
5.2.2 Návrh složení receptur.....	48
5.2.2.2 Diagram navržených receptur hmoty PKM1 s plnivem frakce 0 – 0,63 mm ..	49
5.2.2.3 Diagram navržených receptur hmoty PKM2 s plnivem frakce 0 – 0,63 mm ..	49
5.2.2.4 Diagram navržených receptur hmoty PKM3 s plnivem frakce 0 – 0,63 mm ..	50
5.3 ETAPA III – Návrh metodiky zkoušení polymerních kotvících hmot .....	50
5.3.1 Základní zkoušky .....	50
5.3.2 Pokročilé doplňkové laboratorní zkoušky .....	51
5.3.3 Poloprovozní zkoušení .....	54
5.4 ETAPA IV – Experimentální prověření navržených receptur .....	55
5.4.1 Zkoušení kotvících hmot PKM1 s plnivem frakce $\leq 0,063$ mm .....	55
5.4.2 Zkoušení kotvících hmot PKM1, PKM2 a PKM3 s různým plnivem frakce 0–0,63 mm .....	58
5.4.2.1 Základní zkoušení – PKM1 .....	58
5.4.2.2 Základní zkoušení – PKM2 a PKM3 .....	63

5.4.2.3	Optimalizace hmot PKM1 na základě základních zkoušek .....	70
5.4.2.4	Optimalizace hmot PKM2 a PKM3 na základě základních zkoušek.....	71
5.4.2.5	Stanovení konzistence – Fordův výtokový pohárek .....	73
5.4.2.6	Stanovení tahových vlastností hmot PKM1 a PKM2 .....	74
5.4.2.7	Stanovení rychlosti sedimentace .....	81
5.4.2.8	Zkrácená zkouška chemické odolnosti.....	84
5.4.2.9	Sledování exotermické reakce při polymerizaci kotvící hmoty PKM1 .....	89
5.4.2.10	Stanovení smrštění .....	90
5.4.2.11	Použití uhlíkových nanotrubiček .....	92
5.4.2.12	Zkouška stanovení modulu pružnosti v ohybu.....	93
5.4.2.13	Tepelná odolnost .....	95
<b>5.5</b>	<b>ETAPA V – Optimalizace výsledků pokročilého zkoušení s následným provedením poloprovozního ověření a porovnáním vlastností s dosud používanými kotvícími hmotami .....</b>	<b>96</b>
5.5.1	Optimalizační výpočet.....	96
5.5.2	Zkouška výrobků pro kotvení vytrhávací zkouškou .....	98
5.5.3	Porovnání vyvinutých kotvících hmot s dosavadními hmotami vyskytujícími se na trhu .....	104
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>105</b>
<b>7</b>	<b>Seznamy .....</b>	<b>109</b>
7.1	Seznam použité literatury .....	109
7.2	Seznam použitých zkratk .....	112
7.3	Seznam tabulek .....	112
7.4	Seznam vzorců .....	113
7.5	Seznam obrázků .....	114

# 1 ÚVOD

V dnešní době existuje několik druhů polymerních kotvicích materiálů. Tyto chemické kotvicí malty se používají převážně v průmyslových provozech, ale také v domácnostech. Vývojem a výrobou těchto materiálů se zabývá celá řada firem a společností jak v České republice, tak ve světě. Dnes jsou tyto chemické kotvicí materiály vyráběny převážně na polymerní bázi, protože rychle tuhnou, tvrdnou a je možné je velice rychle zatěžovat na rozdíl od materiálů na silikátové bázi.

Polymerní kotvicí materiály se používají především v oblasti stavebnictví pro kotvení celé řady předmětů, prvků, konstrukcí anebo jejich částí. Slouží například pro kotvení strojů a zařízení, kotvení ocelových, betonových nebo dřevěných konstrukcí, kotvení bezpečnostních svodidel, sloupů, konzolí, stožárů, zateplovacích systémů, zábradlí, zařizovacích předmětů a vybavení v domácnosti a další.

Tato práce se zabývá vývojem nového progresivního kotevního materiálu, s využitím odpadních a druhotných surovin, který bude vykazovat vysoké pevnosti s rychlým nárůstem pevností, minimální smrštění, vysokou houževnatost a chemickou odolnost, a také odolnost vůči vysokým teplotám. Zároveň by tento materiál měl být i cenově přijatelný z důvodu snížení výrobních nákladů použitím odpadních a druhotných surovin jako náhrada primárních surovin, a také úspora pojiva.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### Polymerní kotevní materiály

Polymerní kotvící materiály jsou dnes ve stavebnictví velmi hojně používané. Jejich vývoj jde neustále dopředu a vlastnosti těchto hmot se pořád zlepšují. Tyto chemické kotvící hmoty se využívají pro kotvení nejrozličnějších předmětů a zařízení do nejrozličnějších materiálů. Existuje několik druhů chemických polymerních kotvících hmot, přičemž jednotlivé druhy se liší podle vlastností a typu použití. Vždy je ale důležité vybrat takovou kotevní hmotu, která bude vyhovovat daným požadavkům. Jako pojivo je v těchto polymerních kotvících hmotách použita vždy nějaká pryskyřice. Existují pryskyřice katalytické a nekatalytické, které se pak ještě dále rozdělují.

- **Katalytické pryskyřice**

Katalytické pryskyřice se skládají ze dvou komponentů - pryskyřice a tvrdidla, které způsobuje vytvrzení hmoty. Složky se mísí v poměru 10:1. Katalytické pryskyřice mohou být zejména na polyesterové, epoxidové, vinylesterové, epoxyakrylátové a metakrylátové bázi. Tyto druhy pryskyřic se používají pro kotvení v místech se středním a vysokým zatížením a jsou dnes nejvíce používané především díky jejich vysoké rychlosti tuhnutí. [1]

- **Nekatalytické pryskyřice**

Mezi nekatalytické pryskyřice, které se používají pro kotvení, patří čisté epoxidové pryskyřice (EP). Tyto pryskyřice se mísí s tvrdidlem nejčastěji v poměru 1:1. Specifickou vlastností těchto pryskyřic je pomalejší rychlost tuhnutí než u katalytických, nicméně mají vyšší pevnosti, přilnavost, soudržnost, vykazují minimální smrštění a díky jejich vodonepropustnosti je možné je používat i pod vodou. Tyto pryskyřice se používají pro kotvení v místech s nejvyšším zatížením a namáháním. [1]

## 2.1 Možnosti využití polymerních kotevních materiálů

Chemické kotvicí hmoty se používají pro kotvení:

- strojů a zařízení,
- ocelových, betonových, dřevěných konstrukcí,
- přístřešků,
- schodišťových zábradlí,
- bezpečnostních bariér – svodidlových sloupků,
- různých zařizovacích předmětů,
- výztuže do betonu,
- sloupů, stožárů, konzolí,
- odvětrávaných fasád,
- a dalších.

## 2.2 Druhy podkladních materiálů

Chemické (polymerní) kotvicí hmoty nelze použít pro kotvení do všech materiálů, ale těmito hmotami můžeme kotvit do těchto podkladů:

- Beton, železobeton, lehký beton – pro kotvení jsou vhodné všechny druhy kotvicích materiálů.
- Keramické cihly a tvarovky – pro kotvení lze použít všechny druhy kotvicích prvků. Při použití chemických kotvicích hmot do děrovaných cihel je nutné použití speciálního perforovaného sítko.
- Kámen – hutná struktura, vysoká pevnost v tlaku → pro kotvení lze použít všechny druhy kotvicích materiálů.
- Pórobeton – pórovitá struktura → pro kotvení je potřeba použít speciální hmoždinky určené do pórobetonu, anebo polymerní kotvy.
- Vápenopískové cihly a tvarovky → pro kotvení lze použít všechny druhy kotvicích materiálů. [1]

Těmito hmotami nelze kotvit do dřeva, izolací nebo sypkých materiálů.

## 2.3 Způsoby kotvení v různých materiálech

Kotvící hmoty se používají pro kotvení jak do plných materiálů, jako je beton, plná cihla, kámen, tak i do dutých materiálů jako jsou dutinové cihly. Zde je ale nutno použít speciální síťku pro dokonalé ukotvení.

### 2.3.1 Kotvení do plných materiálů

Před samotnou aplikací kotvící hmoty se doporučuje vyvrtat všechny otvory, do kterých se budou následně kotvit šrouby, svorníky, závitové tyče a další. Kotvené prvky se musí důkladně vyčistit ocelovým kartáčem a zbavit se prachu. Při nedodržení tohoto postupu se zvyšuje riziko nekvalitního ukotvení. Prach vzniklý v otvoru při vrtání vytvoří vrstvu mezi lepidlem a základním materiálem a nedojde ke spojení lepidla, šroubu a betonu. Na hodně namáhaných ocelových konstrukcích, sloupech nebo zábradlích se po zatvrdnutí kotvící hmoty provádí kontrola únosnosti pomocí speciálního trhačího zařízení na předepsanou únosnost. [1]

### 2.3.2 Kotvení do dutých materiálů

Dnes jsou ve stavebnictví velice oblíbené keramické dutinové tvárnice s příčkami kvůli dobrým tepelně izolačním vlastnostem zdících prvků. Velice důležité je vrtání děr bez použití příklepu, aby nedošlo k porušení komůrek v materiálu a bylo možno do čeho kotvit. Pevnost kotveného prvku v tomto případě závisí na pevnosti materiálu, protože u těchto zdících materiálů dochází vždy k vytržení nebo vylomení kotvy i s kusem zdiva. Pro zlepšení účinku kotvící hmoty a úspory kotvící hmoty se do vyvrtaného a očištěného otvoru vloží plastová nebo kovová perforovaná síťka. Ta zajistí zvětšení únosnosti lepeného spoje po celé své délce a zároveň pomáhá regulovat množství kotvící hmoty vtlačené do otvoru. [1]

## 2.4 Důležité faktory zohledňující výběr kotvící hmoty

Při výběru vhodné kotvící hmoty je potřeba zohlednit několik důležitých faktorů, které mohou ovlivnit kvalitu provedení a požadované výsledné vlastnosti.

- Zatížení jaké bude kotvený prvek přenášet,
- materiál, do kterého se bude aplikovat kotvící hmota,
- prostředí, kde se bude kotvit,
- teplota okolí při aplikaci,

- použití v interiéru nebo v exteriéru,
- doba tuhnutí,
- teplotní odolnost,
- chemická odolnost [1]

## 2.5 Druhy zatížení

Podle velikosti tahové síly působící na kotvené prvky se zatížení dělí na:

- Velká zatížení → 10 kN – 100 kN
- Střední zatížení → 1,0 – 10 kN
- Malá zatížení → do 1,0 kN [1]

## 2.6 Faktory ovlivňující dobu zpracování

Při smíchání obou složek kotvící hmoty dochází k exotermické reakci a tím vzniká teplo. Z tohoto důvodu je nutné aplikovat hmotu do otvoru v co nejkratším čase po smíchání obou složek, aby došlo k odvedení vzniklého tepla do výztuže nebo do stěn otvoru, čímž se částečně prodlouží doba zpracování.

**a) Druh chemické kotvící hmoty** – doba zpracování se nejčastěji pohybuje od 2 minut až do 8 hodin. Čím je tato doba zpracování delší, tak tím je delší doba úplného zatuhnutí.

**b) Teplota balení hmoty, teplota prostředí, teplota podkladu** – Čím jsou tyto teploty vyšší, tím je doba zpracování a úplného zatuhnutí kratší. [1]

## 2.7 Aplikace kotvících hmot

Kotvící hmoty je možno aplikovat pomocí univerzální pistole na tmelení nebo při větším objemu kotvení se používají speciální aplikační pistole. Kotvící hmoty jsou dodávány v plastových nebo kovových tubách a kartuších. Plastové se lépe vyprazdňují než kovové, ale v kovových je delší životnost hmoty. Součástí těchto kartuší nebo tub je našroubovatelné kónické vyústění, které se dle požadovaného množství hmoty odřízne v libovolné výšce. Takovéto ústí už většinou obsahuje speciální směšovací přípravek, pomocí kterého dojde ke smíchání obou složek kotvící hmoty. [2]

### 2.7.1 Postup při aplikaci polymerních kotvících hmot

- 1) Vytváření otvorů. Průměry vyvrtaných otvorů by měly být pro šrouby do velikosti M20 o 2 mm větší než jsou průměry šroubů. Pro šrouby M20 – M30 by měly být průměry otvorů o 4 mm větší, než jsou průměry šroubů a pro šrouby větší než M30 by měly být otvory větší o 5 mm, než jsou průměry šroubů.
- 2) Vyčištění otvorů od prachu a nečistot.
- 3) Aplikace kotvící hmoty vytlačáním pomocí speciální pistole z kartuše.
- 4) Ověření přídržnosti a dostatečné únosnosti [2]

Pro zlepšení soudržnosti kotvících hmot k podkladu se používají tzv. adhezní můstky (spojovací materiály). Nejvíce se používají tyto typy adhezních můstků:

- a) na bázi epoxidu
- b) latexové emulze – styren butadien, akryláty, polyvinylacetát [2]

## 2.8 Požadavky na kotvící hmoty na polymerní bázi

Zde jsou uvedeny základní nejdůležitější požadavky na kotvící hmoty na polymerní bázi jako je smrštění, pevnost, chemická a tepelná odolnost.

### 1) Minimální smrštění

Smrštění závisí na chemické bázi polymerového systému kotvící hmoty. Smrštění způsobuje snížení přilnavosti kotvící hmoty mezi podkladem a vlepuvaným prvkem, a tím dochází ke zhoršení výsledných pevností. Důležité je také dodržení rozdílů mezi průměry vyvrtaných otvorů a průměry kotvených prvků. Ty se liší podle velikosti kotvených prvků, ale zpravidla by měly být u menších průměrů přibližně 2 mm a u větších průměrů 4 až 5 mm. Při použití kotvící hmoty na bázi epoxidové pryskyřice může být rozdíl průměrů i větší, protože epoxidové pryskyřice vykazují malé smrštění.

### 2) Chemická odolnost

Chemická odolnost polymerních kotvících hmot patří k jedné z nejdůležitějších požadavků na kotvící hmoty. Chemická odolnost kotvících hmot závisí na chemické odolnosti pojivové složky a také na chemické odolnosti plniva. Zde jsou uvedené jednotlivé druhy používaných pryskyřic a u každé pryskyřice jsou uvedeny chemikálie, vůči kterým jsou pryskyřice odolné.



- Epoxidové pryskyřice (EP) – slabé a silné alkálie, slabé a střední organické kyseliny, některá organická i anorganická rozpouštědla
- Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP) – slabé alkálie, slabé a střední organické kyseliny
- Metakryláty – slabé alkálie, slabé organické kyseliny, organická a anorganická rozpouštědla
- Vinylesterové pryskyřice – slabé alkálie, anorganické kyseliny, slabé a střední organické kyseliny, organická a anorganická rozpouštědla
- Polyuretanové pryskyřice (PU) – slabé a silné alkálie, anorganické kyseliny, slabé a střední organické kyseliny [1]

### 3) Vysoké mechanické pevnosti

Jedním z nejdůležitějších požadavků na kotvící hmoty jsou vysoká pevnost v tahu a pevnost ve smyku. Nejvyšších pevností dosahují kotvící hmoty na bázi epoxidových pryskyřic.

### 4) Tepelná odolnost

Dalším důležitým požadavkem na polymerní kotvící hmoty je dlouhodobá odolnost vysokým teplotám. Tepelná odolnost kotvících hmot rovněž závisí na tepelné odolnosti pojiva a tepelné odolnosti plniva. Každý druh používané pryskyřice jako pojiva odolává různě vysokým teplotám.

## 2.9 Výrobci polymerních kotvících hmot v České republice

V předcházející bakalářské práci byla provedena podrobná rešerše dnes dostupných kotevních materiálů z hlediska druhů výrobků, cen výrobků a výrobců jak v České republice, tak v zahraničí.

Bylo zjištěno, že v České republice je velké množství firem a společností zabývajících se výrobou kotvících hmot. Mezi největší a nejznámější výrobce kotvících hmot patří především společnosti jako je Fischer, která vyrábí mnoho druhů kotvících hmot na všech materiálových bázích a dále společnost Hilti vyrábějící a vyvíjející kotvící hmoty, které jsou určeny pro kotvení prvků s největším a nejnáročnějším zatížením. Mezi další významné výrobce patří také společnosti jako je například Soudal, Den Braven Berner, Sika, Pattex a další.

## 2.10 Výrobci polymerních kotvících hmot v zahraničí

Vzhledem k tomu, že většina těch největších a nejznámějších firem vyrábějící kotvící hmoty jako je Fischer, Hilti, Sika, Den Braven, Soudal, BASF jsou zahraniční firmy, tak výrobky, které se prodávají u nás, jsou dostupné i v zahraničí. V mnoha případech ale některé firmy nenabízejí ve všech zemích všechny druhy kotvících hmot, ale pouze některé z nich.

Společnost Sika uvádí ve světě na trh kotvící hmoty na bázi epoxidové pryskyřice (EP), vinylesterové pryskyřice, polyuretanové pryskyřice a na silikátové bázi.

Společnost Fischer, která je německou společností, má dnes své výroby a prodejny po celém světě. Kotvící hmoty na polyesterové, epoxidové, vinylesterové a polyuretanové bázi, které tato společnost nabízí v České republice, se používají rovněž i v zahraničí.

Společnost Hilti sídlí v Lichtenštejnsku, ale své výroby a vývojové centra má v Evropě i v Asii. Všechny jejich produkty, které nabízejí, jsou buď na epoxidové nebo vinylesterové bázi.

Soudal je belgickou společností, vyrábějící kotvící hmoty na bázi polyesterové, vinylesterové a epoxidové pryskyřice a tyto produkty také prodává v mnoha dalších zemích.

Společnost Den Braven má pobočky v Nizozemsku, České republice, Slovenské republice a v Německu, přičemž všude vyrábí stejné produkty. Mezi další výrobce kotvících hmot v zahraničí patří například společnosti Atlas v Polsku, King Construction products v Kanadě, Roberlo ve Španělsku, SkilledBuild v Anglii a další.

## 2.11 Základní rozdělení polymerních kotvicích hmot

V současnosti jsou nejpoužívanější systémy chemických kotev na následujících polymerních bázích:

- polyesterové (obsahující styren i bez styrenu) – většinou vhodné pro interiéry a spoje, které nejsou vystaveny trvalé vlhkosti,
- vinylesterové (obsahující styren i bez styrenu) – pro interiéry i exteriéry,
- epoxyakrylátové (obsahující styren i bez styrenu) – pro interiéry i exteriéry,
- epoxidové – vysoce pevné, odolné vibracím, s vysokou stabilitou a chemickou odolností,
- speciální hybridní malty – specifické produkty pro konkrétní použití.

Každá tato chemická kotva je vhodná pro určitý druh kotvení, ale ty nejkvalitnější kotvicí hmoty lze samozřejmě použít pro kotvení do většiny materiálů. Při kotvení v interiéru je vhodné používat takové kotvicí hmoty, které jsou bezrozpuštědlové a neobsahují např. styren, a další aditiva patřící mezi karcinogenní a toxické látky. Principem bezrozpuštědlové EP je zakomponování reaktivního rozpuštědla do makromolekulární sítě během vytvrzování, čímž dochází k zabránění uvolňování nebezpečných látek. [3]

Složení je většinou následující: pryskyřice, aditivum (vypěňovací, flexibilizační, zahušťující, aditiva zajišťující nelepivost povrchu, tužidla), plnivo, pigment a reaktivní složka. Skládají se nejčastěji ze dvou pryskyřičných částí samostatně oddělených. Jednou složkou je syntetická pryskyřice a druhou je tvrdidlo nebo katalyzátor tuhnutí. Jejich smíšením se mění jejich vlastnosti. Ke smíchání dochází ve směšovači při vytlačování směsi pomocí speciální aplikační pistole. Výsledná smíchaná směs má tuhou konzistenci a proto ji můžeme používat pro kotvení nejen do vertikálních otvorů ale i do horizontálních otvorů. Po skončení polyadichní reakce se mezi kotevním materiálem, kotveným předmětem a podkladem vytvoří nerozebíratelný slep. [1]

### 2.11.1 Polymerní kotevní hmota na bázi polyesterové pryskyřice

Jedná se o chemickou kotvu na bázi dvousložkové polyesterové pryskyřice, která je určena pro velice rychlé kotvení s vysokou pevností a vytvrzování probíhá různými chemickými reakcemi. Jednou složkou hmoty je nenasyčená polyesterová pryskyřice (UP) a druhou složkou je iniciátor tuhnutí.

Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP) jsou roztoky lineárních nenasyčených polyesterů v polymerace schopných monomerech. UP se připravují polyesterifikací nenasyčených dikarboxylových kyselin s dioly. [3]

Při vytvrzování UP dochází ke spojování řetězců nejčastěji styrenovými můstky. Jedná se o kopolymeraci dvojných vazeb nenasyčeného polyesteru dvojnými vazbami reaktivního monomeru. Vytvrzení lze urychlit použitím iniciátoru (např. organické peroxidy – nejčastěji dibenzoylperoxid) nebo UV zářením. Peroxid se nikdy nesmí smísit s urychlovačem (vytváří výbušnou směs), nejprve se zamíchá urychlovač a pak peroxid. V průběhu vytvrzování dochází k exotermickému efektu. [3]

Chemické kotvy na bázi polyesterových pryskyřic se vyrábějí, buď se styrenem, nebo bez styrenu. Chemické kotvy, které neobsahují styren, jsou vhodné pro kotvení do uzavřených prostorů, protože nezapáchají, nicméně jsou o něco dražší než chemické kotvy se styrenem.

Lze je použít pro kotvení téměř do všech stavebních materiálů. Před samotným injektováním chemické kotvy, je nutné vyvrtaný otvor pořádně vyčistit od prachu a nečistot, protože nečistoty na stěnách otvorů způsobují výrazné snížení pevností. Používají se pro střední a nižší beznapětové kotvení.

#### **Vlastnosti:**

- Snadná aplikovatelnost,
- vysoká rychlost tuhnutí – při teplotě 20 °C asi 50 minut,
- rychle tuhnoucí (počátek tuhnutí nastává ve statickém směřovači při smísení obou složek a doba vytvrzení je závislá na teplotě hmoty a teplotě podkladu, přičemž se pohybuje se od 15 minut do 8 hodin),
- aplikační teplota je od – 5 °C do +25 °C (+35 °C),
- teplotní odolnost po vytvrzení je od – 40 °C do +40 °C (+110 °C),
- lze kotvit prvky M8 – M24 [4],
- konzistence - většinou tixotropní pasta,
- kombinované selhání vytažení a vytržení kužele betonu z netrhlinového betonu C20/25 (Charakteristická pevnost v netrhlinovém betonu např. M8 – 20 kN) [4],
- pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech tvrdnutí v rozmezí 30–60 MPa
- pevnost v tlaku po 7 dnech tvrdnutí v rozmezí 50–110 MPa

- Odolnost při zátěži – beton třídy > C20/25 – M8 - 4.7 kN [5]
- Smrštění 2–20 %
- Cena se pohybuje přibližně 200 Kč za balení 300 ml

### 2.11.2 Polymerní kotvící hmota na bázi epoxidové pryskyřice (EP)

Chemická kotva na bázi dvousložkové čisté epoxidové pryskyřice slouží především pro kotvení při velmi vysoké zátěži v tlakové i tahové části betonu a také v trhlinovém betonu. Jednu složku hmoty tvoří samotná epoxidová pryskyřice (EP) a tou druhou je tvrdidlo.

Pod pojmem epoxidové pryskyřice (EP) rozumíme sloučeniny, které obsahují více než jednu epoxidovou (oxiranovou) skupinu. Nejběžnějším typem jsou produkty alkalické kondenzace epichlorhydrinu (EPC) s bisfenolem A (BPA), tvořící přibližně – (85 % světové produkce). Vytvrzování EP je proces, ve kterém se pomocí chemických reakcí převádějí nízkomolekulární, rozpustné epoxidové monomery a oligomery na netavitelné (zvýšením teploty netvarovatelné) a nerozpustné reaktoplasty, které mají převážně trojrozměrnou strukturu. Epoxidové pryskyřice (EP) dosahují po vytvrzení řady nových vlastností, jako je vysoká mechanická pevnost a houževnatost, požadovaná elasticita a rozměrová stálost, tepelná a chemická odolnost apod., které jsou pro většinu aplikací ve stavebnictví nezbytné. [7]

Této polymerní kotvící hmotě je v teoretické části práce věnováno více pozornosti z důvodu využití epoxidové pryskyřice v následující experimentální části.

#### Způsoby vytvrzování epoxidových pryskyřic

Epoxidové pryskyřice lze vytvrzovat těmito způsoby:

- polymerací nebo polyadací epoxidových skupin (např. polyaminy a anhydridy polykarboxylových kyselin),
- polykondenzací hydroxylových skupin.

#### Skupiny tvrdidel používající se pro vytvrzování epoxidových pryskyřic:

- polyaminy – nejpoužívanější (funkční skupina –  $\text{NH}_2$ ),
- polythioly – citlivé na dávkování, moc se nepoužívají (funkční skupina –  $\text{SH}$ ),
- anhydridy polykarboxylových kyselin – často používané – lze použít při různých teplotách a relativních vlhkostech, vysoká trvanlivost i při nižších teplotách,

- jiné epoxidové pryskyřice – polymerace jinými epoxidovými pryskyřicemi,
- jiné pryskyřice – fenolformaldehydové, močovinoformaldehydové. [3]

Ze všech druhů chemických kotev je tato chemická kotva určena právě pro největší možná zatížení v kombinaci se závitovými svorníky. Vzhledem k výborným vlastnostem této hmoty patří k těm nejdražším kotvicím hmotám. Tato hmota umožňuje kotvení prvků do otvorů s větším rozdílem průměrů mezi vyvrtaným otvorem a kotveným prvkem.

Lze ji použít pro kotvení do všech stavebních materiálů. Před samotným injektováním chemické kotvy, je nutné vyvrtaný otvor důkladně vyčistit od prachu a nečistot, protože nečistoty způsobují výrazné snížení pevností.

**Vlastnosti:**

- vhodné pro extrémně namáhané konstrukce,
- velmi dobrá přilnavost k velkému množství materiálů jako jsou kovy, sklo, dřevo, keramika a jiné. Oproti těmto materiálům se špatně pojí s materiály s málo polárním povrchem jako PVC, PE, PP a jiné,
- velmi dobrá chemická odolnost,
- minimální objemové smrštění,
- lze aplikovat i ve vlhkém betonu (vodouředitelné) a při vysokých teplotách,
- teplota při zpracování od +5 °C do +40 °C,
- doba zpracování při 20 °C cca 20 minut a doba vytvrzení cca 15 hodin
- vysoká teplotní odolnost po vytvrzení od -40 °C (-42 °C) do +35 °C (+80 °C),
- touto kotvou lze kotvit svorníky M8 – M56,
- pevnost v tlaku při 20 °C po 7 dnech tvrdnutí přibližně 100–120 MPa, [8]
- charakteristická pevnost v tahu v netrhlinovém betonu třídy C 20/25 např. M8 13,4 kN, [9]
- minimální smrštění,
- cena se pohybuje okolo 1200 Kč za balení 300 ml.

Počátek tuhnutí nastává ve statickém směšovači při smísení obou složek dohromady a doba vytvrzení závisí na teplotě hmoty a teplotě podkladu.

### 2.11.3 Polymerní kotvící hmota na bázi vinylesterové pryskyřice

Jedná se o chemickou kotvící hmotu na bázi dvousložkové vinylesterové pryskyřice. Většinou jsou vyráběny bez styrenu a někdy obsahují příměs portlandského cementu. Vytvrzování vinylesterových pryskyřic probíhá radikálovou polymerací dvojných vazeb. [1]

Vinylesterové pryskyřice kombinují nejlepší charakteristické vlastnosti polyesterových a epoxidových pryskyřic a mají oproti polyesterovým větší houževnatost.

Kotvící hmoty obsahující příměs portlandského cementu se vyznačují lepší přilnavostí a protikorozií ochranou. Vyrábějí se buď se styrenem, nebo bez styrenu.

Také je lze použít pro kotvení do všech stavebních materiálů. Před samotným injektováním chemické kotvy, je nutné vyvrtaný otvor pořádně vyčistit od prachu a nečistot, protože nečistoty způsobují výrazné snížení pevností.

Tyto kotvící hmoty patří mezi nejrozšířenější na trhu a slouží pro kotvení při velmi vysoké zátěži v tlakové i tahové části betonu, v trhlinovém betonu.

#### Vlastnosti:

- nehořlavá, vysoká chemická odolnost,
- krátká doba tuhnutí, úplné zatuhnutí od 10 minut do 24 hodin,
- pevnost v tlaku po 7 dnech tvrdnutí přibližně 80–110 MPa,
- pevnost v ohybu po 7 dnech tvrdnutí přibližně 35–40 MPa,
- velmi slabý zápach
- aplikační teplota -10 °C (-5 °C) až +35 °C (+40 °C),
- vysoká teplotní odolnost po vytvrzení od -40 °C do +80 °C (+150 °C)
- vhodná do vlhkého prostředí, vodotěsná, aplikace v zatopených dírách a v mokřem betonu,
- slouží pro kotvení ocelových svorníků M6 – M30, [10]
- charakteristická pevnost v tahu v suchém netrhlinovém betonu třídy C 20/25 při M8 8,5 kN, [10]
- cena se pohybuje přibližně okolo 400 Kč za balení 300 ml.

#### **2.11.4 Polymerní kotvící hmota na bázi epoxy-akrylátů**

Jedná se o dvousložkovou rychle tuhnoucí kotvící hmotu. Vyrábí se buď se styrenem, nebo bez styrenu. Pryskyřice je míchána s tvrdidlem v poměru 10:1. Tato kotvící hmota je určena pro kotvení středních až vyšších zátěží. Pro tento typ chemické kotvy jsou charakteristické tyto vlastnosti:

- minimální smrštění,
- teplotní odolnost od -40 °C do +50 °C (+80 °C),
- doba vytvrzení v suchém otvoru při 20°C přibližně 20 minut,
- charakteristická pevnost v tahu v netrhlinovém betonu třídy C 20/25 pro M8 je přibližně 8 kN. [11]

#### **2.11.5 Polymerní kotvící hmota na bázi metakrylátů**

Jedná se o dvousložkovou bezrozpuštědlovou kotvící hmotu s poměrem mísení obou složek 10:1, přičemž ke smíšení v tomto poměru už dochází ve statickém směšovači. Používá se pro kotvení středně těžkých až těžkých břemen. Vyrábí se buď se styrenem, nebo bez styrenu. Používá se pro kotvení, ale nepatří mezi nejběžněji používané. Pro tento typ chemické kotvy jsou charakteristické tyto vlastnosti:

- aplikační teplota od -5 °C do +35 °C,
- teplotní odolnost od -20 °C do +40 °C,
- doba vytvrzení v suchém betonu při 20 °C je přibližně 70 minut,
- charakteristická pevnost v tahu v neporušeném betonu třídy C 20/25 až C 50/56 při M8 25 kN (35 kN), [12]
- relativně dobře chemicky odolná,
- velmi malé smrštění.

#### **2.11.6 Polymerní kotvící hmota na bázi polyuretanové pryskyřice**

Tato dvousložková chemická kotvící bezrozpuštědlová hmota slouží k připevňování lehkých předmětů do všech možných materiálů. Vytvrzuje se zesítováním vazeb a řadí se mezi nejpružnější polymery. Není moc obvyklá. Většinou obsahují benzen a xylen. Lze jednoduše regulovat viskozitu.



**Vlastnosti:**

- bez zápachu,
- přetíratelná, brousitelná,
- doba vytvrdnutí je 3–5 minut,
- aplikační teplota +10 °C až + 30 °C,
- po vytvrdnutí odolává teplotám od -10 °C do + 40 °C,
- lze ji použít pro kotvení šroubů do průměru 6 mm,
- vysoká přilnavost,
- během vytvrzování expanduje,
- cena přibližně okolo 300 Kč za 50 ml.

Tabulka č. 1 – Vlastnosti nejpoužívanějších kotvicích hmot

Parametr	PES	EP	VES
Pevnost v tlaku [MPa]	80–100	100–120	80–110
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	28–60	60–70	35–40
Aplikační teplota	-5 °C až +25 °C (+30 °C)	+5 °C až +40 °C	-10 °C (-5 °C) do +35 °C(+40 °C)
Doba zpracování [min.]	15	20	5
Doba tuhnutí	50 minut	15 hodin	10–24 hodin
Teplotní odolnost	-40 °C do +40 °C (+110 °C)	-40 °C (-42 °C) do +35 °C (+80 °C)	-40 °C do +80 °C (+150 °C)
Charakteristická pevnost v tahu M8 [kN]	20	20	8,5
Cena za balení 300 ml [Kč]	200	1200	400

**2.12 PLNIVA**

Plniva se používají do všech kotvicích hmot za účelem úspory velmi drahé pojivové složky a také pro zlepšení některých vlastností kotvicích hmot. Mohou to být písky, skleněné vložky, vápenec, skelné nebo uhlíkové vlákna, nanoplňiva a další. Kromě těchto primárních surovin, se mohou jako plnivo používat i některé druhy speciálně upravených druhotných surovin.

### 2.12.1 Primární suroviny

Výhodou primárních surovin je jejich čistota, nezávadnost, předem známé složení, stálé vlastnosti a dlouhodobá zkušenost s jejich využíváním. Zde jsou uvedené některé druhy primárních surovin, které se buď používají, nebo je možné je použít jako plnivo do polymerních kotvících hmot z důvodu úspory drahé pojivové složky a zlepšení celkových vlastností hmoty

**Křemičitý písek** – používá se jako plnivo především v kotvících hmotách na EP bázi, přičemž bývá upraven přímo pro tyto účely. Tento písek je velmi čistý a suchý a má optimální tvar zrn a obsahuje až 99,6 %  $\text{SiO}_2$ . [13]

**Skleněné vločky** – jedná se o velmi tenké rovinné destičky s hladkým povrchem, které mají tloušťku v rozmezí 7–100  $\mu\text{m}$  a jsou 10–4000  $\mu\text{m}$  široké. Používají se jako plnivo do ochranných nátěrů. Mají velmi dobrou chemickou odolnost a odolnost proti vodě. Zároveň zvyšují povrchovou tvrdost a oteřuvzdornost výsledného produktu. Vločky, vzhledem k jejich tvaru, tvoří ve hmotě husté překážky, které zabraňují průniku vody a chemických látek. Existuje více druhů těchto vloček, které se liší poměrem tloušťky a šířky vloček. Měrná hmotnost vloček je 2470  $\text{kg/m}^3$ . Jejich nevýhodou je vysoká cena. Dodavatelem těchto skleněných vloček je např. Worlee - Chemie GmbH. [14]

Tabulka č. 2 – Průměrné chemické složení skleněných vloček:

Jednotlivé oxidy	Obsah [%]	Jednotlivé oxidy	Obsah [%]
$\text{SiO}_2$	65,100	$\text{K}_2\text{O}$	2,500
$\text{Al}_2\text{O}_3$	4,110	$\text{Na}_2\text{O}$	8,420
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,121	$\text{Li}_2\text{O}$	0,002
$\text{CaO}$	6,410	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,004
$\text{MgO}$	2,280	$\text{BaO}$	0,007
$\text{TiO}_2$	0,021	$\text{ZrO}_2$	0,021
$\text{MnO}$	0,001	$\text{PbO}$	0,005
$\text{ZnO}$	0,010		

**Sklářský písek** – je nejdůležitější sklářskou surovinou. Z důvodu dosažení čistoty skla, musí být písek řádně očištěn a pomletý na frakci 0,6–0,1 mm.

Tabulka č. 3 – Průměrné chemické složení sklářského písku:

Jednotlivé oxidy	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$
Obsah [%]	60–99,8	0,005–0,010	0,0001–0,001	0,5

### 2.12.2 Druhotné suroviny

Druhotné suroviny jsou takové suroviny, které vznikají jako vedlejší produkt při průmyslové výrobě, jsou již částečně nebo zcela upravené a většinou se dají použít znova ve výrobě. Tyto suroviny už v současnosti nejsou zdarma a musí se za ně platit. Zde jsou uvedené některé druhy druhotných surovin, které jsou potenciálně vhodné jako náhrada primárních surovin za účelem využití odpadů do výroby, omezení používání drahých primárních surovin a zlepšení celkových výsledných vlastností hmoty.

**Mikrosilika** – jedná se o extrémně jemné mikročástice amorfního  $\text{SiO}_2$  vznikající při výrobě ferosilicia ( $\text{FeSi}$ ) s velkým měrným povrchem. Získávají se odprašováním kouřových plynů z pecí při výrobě ferosilicia nebo jiných feroslitin. Přidávají se především pro zvýšení výsledných pevností materiálů.

**Elektrárenský popílek** – jedná se o nerostný zbytek vzniklý spalováním uhlí, který se získává zachycováním z plynných spalin v odlučovacích zařízeních ve formě prášku. Existují dva typy, a to vysokoteplotní (křemičitý typ) nebo fluidní (vápenatý typ). Velikosti zrn popílků se pohybuje od 0,1  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$  a jsou částečně závislé na zrnitosti spalovaného uhlí. Jako příměs do stavebních hmot se převážně využívá vysokoteplotní popílek díky jeho lepším vlastnostem. [15]

- **Vysokoteplotní popílek** – vzniká při spalování uhlí při teplotách 1200 °C – 1700 °C. Částice popílku jsou kulovité, mají šedou až černou barvu. Obsahují amorfni  $\text{SiO}_2$  a krystalickou fázi, minerály železa, zbytky nespáleného uhlí a další. Zachytávání popílku probíhá v mechanických odlučovačích nebo v elektrofiltrech.

Tabulka č. 4 – Průměrné chemické složení vysokoteplotních popílků:

Jednotlivé oxidy	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$
Obsah [%]	45–55	20–25	5–15	2–10	1–3	0,1–1,2

- **Fluidní popílek** – vzniká při spalování uhlí spolu s vápencem ve fluidním loži při teplotě 850 °C. Zrna těchto popílků jsou porézní, mají velký měrný povrch a nejsou kulovité. Tyto popílků obsahují vyšší množství volného vápna (15–30 %) a vysoký obsah  $\text{SO}_3$  (7–18 %).

Tabulka č. 5 – Průměrné chemické složení fluidních popílků: [16]

Jednotlivé oxidy	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
Obsah [%]	30–50	15–21	5–9	15–30	1–4	7–18

**Odpadní lupky** – lupky vznikají výpalem jílovce. Používají se pro výrobu žárobetonu a žáruvzdorné keramiky, keramických hmot, forem ve slévárnách a další.

### Struska

- **Vysokopecní jemně mletá struska** – latentně hydraulická látka, vznikající pomletím vysokopecní granulované strusky, která vzniká prudkým ochlazením roztavené tekuté strusky. Čím je chlazení rychlejší, tím víc obsahuje struska sklovité fáze a je reaktivnější. Vysokopecní struska je vedlejším produktem hutnické výroby a vzniká tavením hlušin rud se struskotvornými přísadami a minerálními podíly paliva. [17]

Tabulka č. 6 – Průměrné chemické složení strusky:

Jednotlivé oxidy	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO
Obsah [%]	28–38	8–24	1–3	30–50	1–18

- **Ocelářská jemně mletá struska** – vzniká při zkujňování oceli, kryje hladinu roztaveného kovu a liší se podle druhu zkujňovacího pochodu. [1]

**Drcené sklo** – získává se drcením odpadního skla z oken automobilů, ze solárních panelů, ze zářivek, ze sklenic, ze sklářské výroby, z výroby skloviny, ze skelné vaty, apod.

Sklo ze solárních panelů - Solární panely jsou dvojího typu. Buď QS solar nebo LDK solar.

- Typ LDK Solar – tento typ solárních panelů byl založen také v Číně a obsahuje polykrystalický křemík. Tyto panely odolávají UV záření, povětrnostním vlivům a vlhkosti.
- Typ QS Solar – tento typ solárních panelů je jedním z nejrozšířenějších a byl založen v Šanghaji. Tyto panely obsahují především amorfní křemík.

**Odpad z výroby Balotiny** – jedná se o skleněné mikrokuličky vyrobené ze sodnodraselného skla, které se vyznačují výbornými optickými vlastnostmi. Velikost kuliček je menší nebo rovna 1 mm. Vzhledem k jejich širokému spektru frakcí mají široké uplatnění. Používají se například pro leštění nerezových výrobků, výrobků z barevných kovů, renovaci nebo sjednocování povrchů. [14]

Tabulka č. 7 – Průměrné chemické složení Balotiny:

Jednotlivé oxidy	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	Ostatní
Obsah [%]	65	0,5–2	0,15	8	2,5	7–18	max. 2

**NaSX** – jedná se o speciální druh skla od výrobce skloviny Kavalierglass

Tabulka č. 8 – Průměrné chemické složení skla NaSX:

Jednotlivé oxidy	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
Obsah [%]	78,7	2,94	3,74

**Trubicové solární kolektory** – jsou tvořeny dvěma vrstvami borosilikátového skla. Použití tohoto skla je problematické, protože sklo je mastné od tekutého média proudícího v kolektorech a je složitější ho zbavit mastnoty.

**Odpadní sklo z výroby skelné vaty** – jedná se o druh minerální izolace vyrobená ze skleněných vláken. Skelná vata se používá ve stavebnictví jako tepelná a zvuková izolace. Její výhodou je nízká objemová hmotnost, nehořlavost a hygienická nezávadnost.

Tabulka č. 9 – Průměrné chemické složení odpadního skla ze skelné vaty:

Jednotlivé oxidy	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Borax	Živec	Vápenec
Obsah [%]	65	15	8	-	-	-

**Kamenné odprašky** – jedná se o jemné částice, které vznikají při drcení kameniva a jsou zachytávány ve filtrech.

**Brusné a řezné kaly** – vznikají broušením různých druhů oceli a obsahují více než 70 % kovu. Někdy mohou obsahovat i prvky jako wolfram, molybden, kobalt, vanad, nikl a chrom, které vznikají při broušení legované oceli. Kaly přímo z výroby jsou znečištěné a před použitím se musí zbavit nežádoucích látek.

**Slévárenský písek** – tento písek je odpadem ze slévárenských provozů, kde se používá čistý jemný křemičitý písek pro vytváření forem. Jako pojivo písků se používají různé pojivové systémy (např. vodní sklo, živice). Po odlití a zatuhnutí se forma rozbije a písek se třídí a ukládá do zásobníků. [17]

### 2.12.3 Rozptýlená výztuž

Uhlíkové nanokuličky, nanotrubičky, nanovlákná – používají se pro zlepšení tahových vlastností a houževnatosti výsledného materiálu. Jedná se ale o velice drahou příměs.

**Uhlíkové nanokuličky** – jedná se o molekuly uhlíku uspořádané do šestiúhelníku a tyto šestiúhelníky jsou zabalené do kuliček

**Uhlíkové nanotrubičky** – jedná se o trubičky o průměru 1 nm. Tyto trubičky jsou přibližně 100 krát silnější než ocel a přitom váží asi jen šestinu hmotnosti oceli. Mají velice zajímavé elektronické, magnetické a mechanické vlastnosti. Grafitová vrstva trubičky je tvořena šestiúhelníky, navzájem spojenými ve vrcholech a srolována do tvaru válce. Uhlíkové nanotrubičky mají mnoho struktur, které se liší délkou, tloušťkou a počtem vrstev. [18]-[19]

**Uhlíkové nanovlákná** – jsou vlákna, jejichž průměr se pohybuje v řádech desítek až stovek nanometrů. Jejich významnou vlastností je vysoká porozita, malá velikost pórů, značná délka a minimální průměr. Vyrábí se nejčastěji elektrostatickým zvlákňováním. Uhlíková nanovlákná se dají vyrobit také ze vzduchu. Tento způsob výroby je sice levnější než dosavadní výroba, ale je podstatně pomalejší. Používají se pro zvýšení tahových pevností, modulu pružnosti, smykových pevností a snížení rizika vzniku trhlin. [20]

## 2.13 Zkoušení a hodnocení kotvících hmot dle současných požadavků a norem

Tato část týkající se zkoušení a hodnocení kotvících hmot je podrobně zpracována v bakalářské práci. Zkoušení a hodnocení se provádí podle českých (ČSN) evropských (EN) a českých harmonizovaných norem (ČSN EN), dále také podle evropských řídících pokynů ETAG, mezinárodních předpisů ISO, amerických předpisů ASTM a německých předpisů DIN. [1]

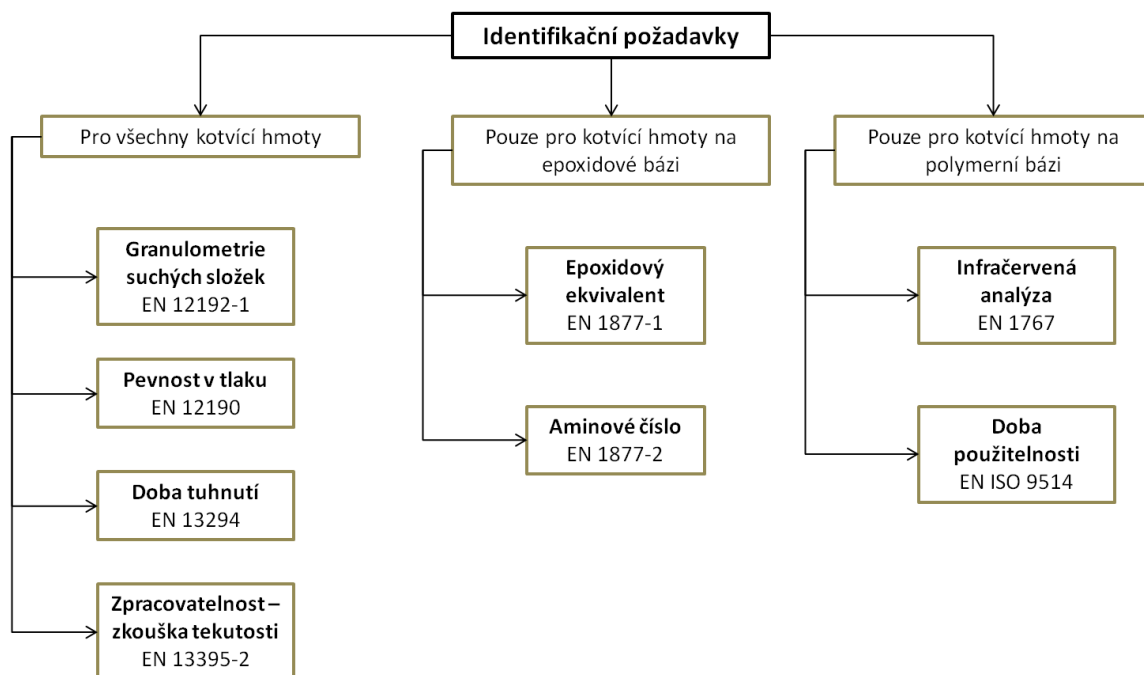
### 2.13.1 Požadavky na kotvící hmoty

Požadavky na kotvící hmoty jsou dány řídícími pokyny pro evropská technická schválení ETAG – ETAG 001 Kovové kotvy do betonu a normou ČSN EN 1504-6 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody – Část 6: Kotvení výztužných ocelových prutů a ČSN EN 1504-6 Část 3: Opravy se statickou funkcí a bez statické funkce.

- 1) Identifikační požadavky
- 2) Požadavky na funkční vlastnosti
- 3) Uvolňování nebezpečných látek
- 4) Reakce na oheň

#### 1) Identifikační požadavky

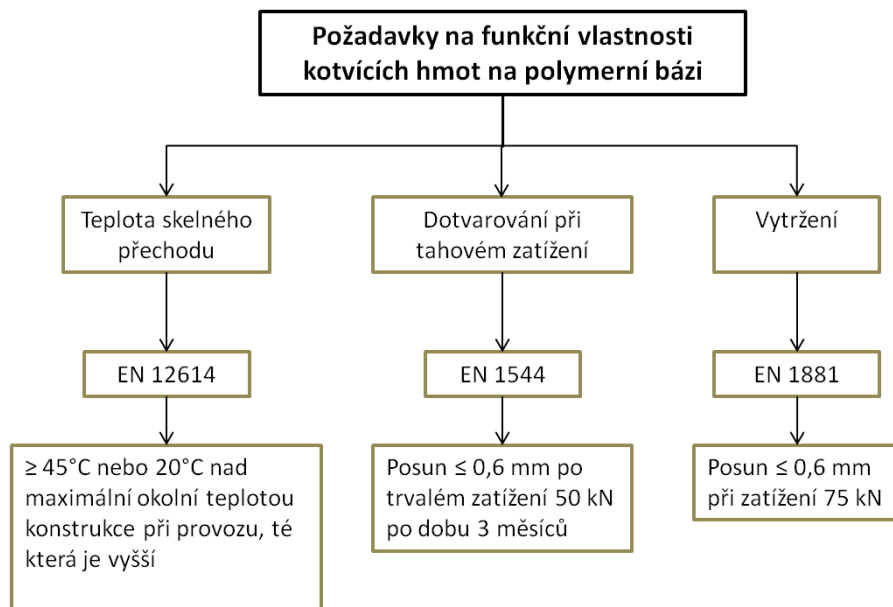
Výrobce musí uvádět tyto identifikační požadavky pro případnou kontrolu složení výrobků a musí uchovávat zprávy o provedených zkouškách. [21]



## 2) Požadavky na funkční vlastnosti:

Výrobce kotvicích hmot je povinen provádět tyto předepsané zkoušky podle stanovených norem a výsledky zkoušek musí vyhovovat těmto požadavkům, které norma určuje. [21]

- **Výrobky pro kotvení**



## 3) Uvolňování nebezpečných látek

Kotvicí hmoty nesmí uvolňovat látky nebezpečné pro zdraví, hygienu a životní prostředí a musí vyhovovat daným nařízením a vyhláškám, které jsou blíže uvedeny v bakalářské práci.

## 4) Reakce na oheň

U výrobků – kotvicích hmot, které jsou vystaveny ohni, musí výrobce uvést klasifikaci výrobku pro kotvení podle výsledků zkoušek reakce na oheň. Výrobky, které obsahují maximálně 1% hmotnostní nebo objemové organického materiálu rovnoměrně rozmístěného, mohou být bez nutnosti zkoušení zařazeny do třídy reakce na oheň A1.

Kromě výše uvedených požadavků, které musí kotvicí hmoty splňovat, se na kotvicích hmotách provádí celá řada dalších nezávazných doplňkových zkoušek, které mají pouze informativní charakter a blíže popisují vlastnosti kotvicích hmot.



### **2.13.1.1 Zkoušení chemické odolnosti**

Podle normy EN 13529 se chemická odolnost zkouší s velkým množstvím různě agresivních chemických látek. Tato zkouška není podle normy povinná, ale může být požadována v případě, kdy budou kotvící hmoty použity do extrémních podmínek. Provádí se buď zkoušení odolnosti proti všem možným druhům chemikálií, nebo jen proti některým určeným chemikáliím. V tomto případě se uvádí, se kterými chemikáliemi se zkouška prováděla. Uvedené chemické látky představují všechny možné typy agresivních prostředí.[1]

### **2.13.2 Legislativní předpisy pro používání odpadů do výroby**

Pokud se používají odpady z průmyslové výroby pro výrobu kotvících hmot, tak musí tyto odpady vyhovovat daným nařízením a vyhláškám o používání odpadů ve stavebnictví, jejich klasifikaci, zdravotní a hygienické nezávadnosti, která by mohla mít nepříznivý dopad na životní prostředí. Jednotlivá nařízení a vyhlášky jsou uvedeny v bakalářské práci. [1]

## **Shrnutí teoretické části**

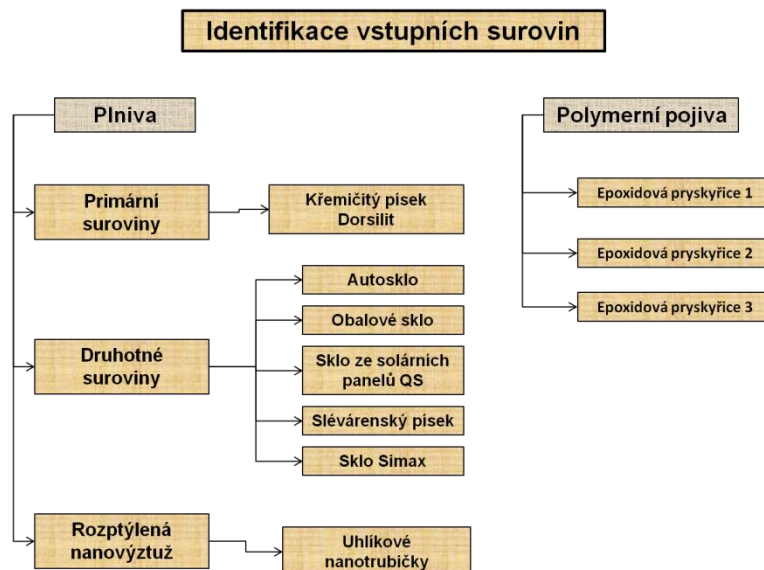
V teoretické části práce jsou shrnuty dosavadní poznatky z oblasti kotvících hmot. Jsou zde uvedené jednotlivé druhy kotvících hmot, které se dnes používají, jejich vlastnosti, výhody a nevýhody, přibližné ceny a také výrobci. Dále jsou zde uvedené dosavadní legislativní požadavky a předpisy na tyto hmoty. Jsou zde také uvedeny jednotlivé druhy možných a používaných plniv, které mohou být na bázi primárních nebo druhotných surovin. Tyto informace byly převzaty a doplněny z předcházející bakalářské práce [1], která se podrobně zabývala touto problematikou. Z výše uvedených druhů kotvících hmot se jako nejlepší a nejkvalitnější, jeví kotvící hmoty na bázi epoxidových pryskyřic, a to především z důvodu nejlepších fyzikálně-mechanických vlastností.

### 3 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce bude vyvinout progresivní kotevní materiál na polymerní bázi, který bude určen pro velice rychlé lepení kotev zejména do vysoko-pevnostních betonů, kde bude využito výrazně vyšších smykových pevností a adhezivity navrhovaného materiálu oproti stávajícím lepícím hmotám. Požadována je dobrá dlouhodobá odolnost vyšším teplotám. Záměrem bude vyvinutí vysoce kvalitního materiálu vynikajícího poměrem mezi rychlostí aplikace a nárůstem pevností, vysokou chemickou odolností a zejména minimálním smrštěním. Tento kotevní materiál bude určen zejména pro kotvení stavebních konstrukcí, těžkých strojů, bariér a dalších. Dílčím cílem práce je prozkoumání možnosti využití některých typů speciálně upravených druhotných surovin a progresivních nanoplňiv, jako jsou dispergované uhlíkové nanovlákná nebo nanotrubičky, přičemž z těchto plniv budou na základě pokročilého laboratorního testování vybrány ty nejvhodnější.

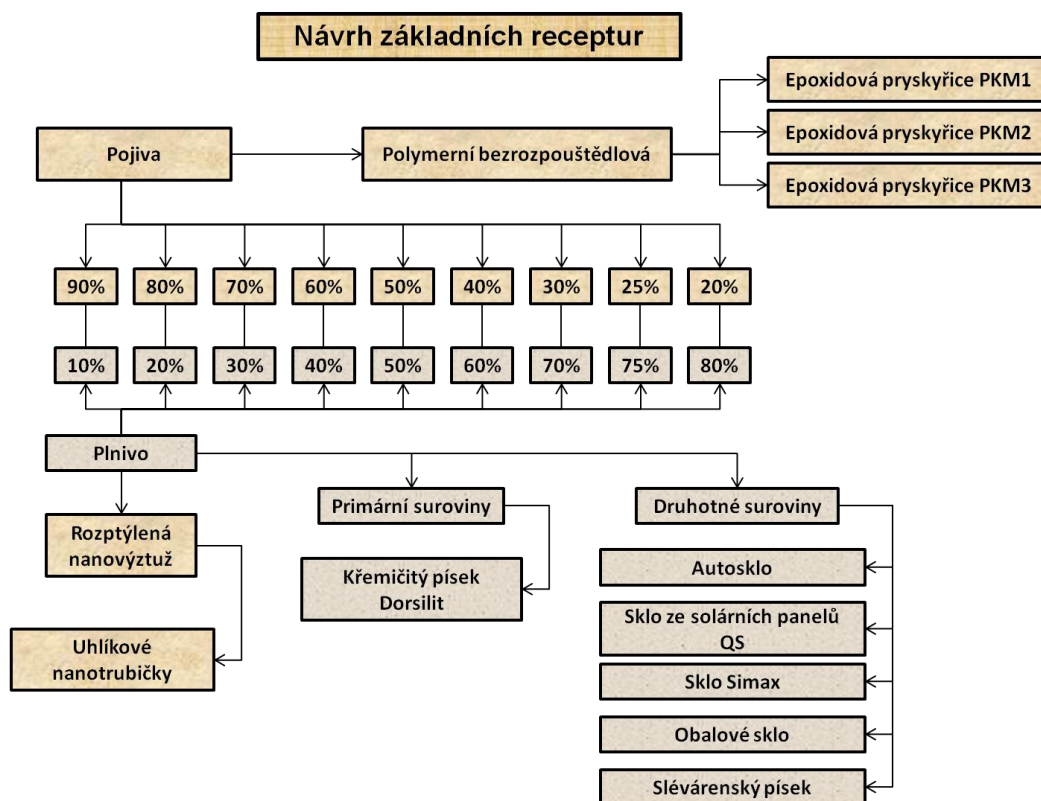
### 4 METODIKA PRÁCE

#### 4.1 Etapa I – Identifikace vstupních surovin



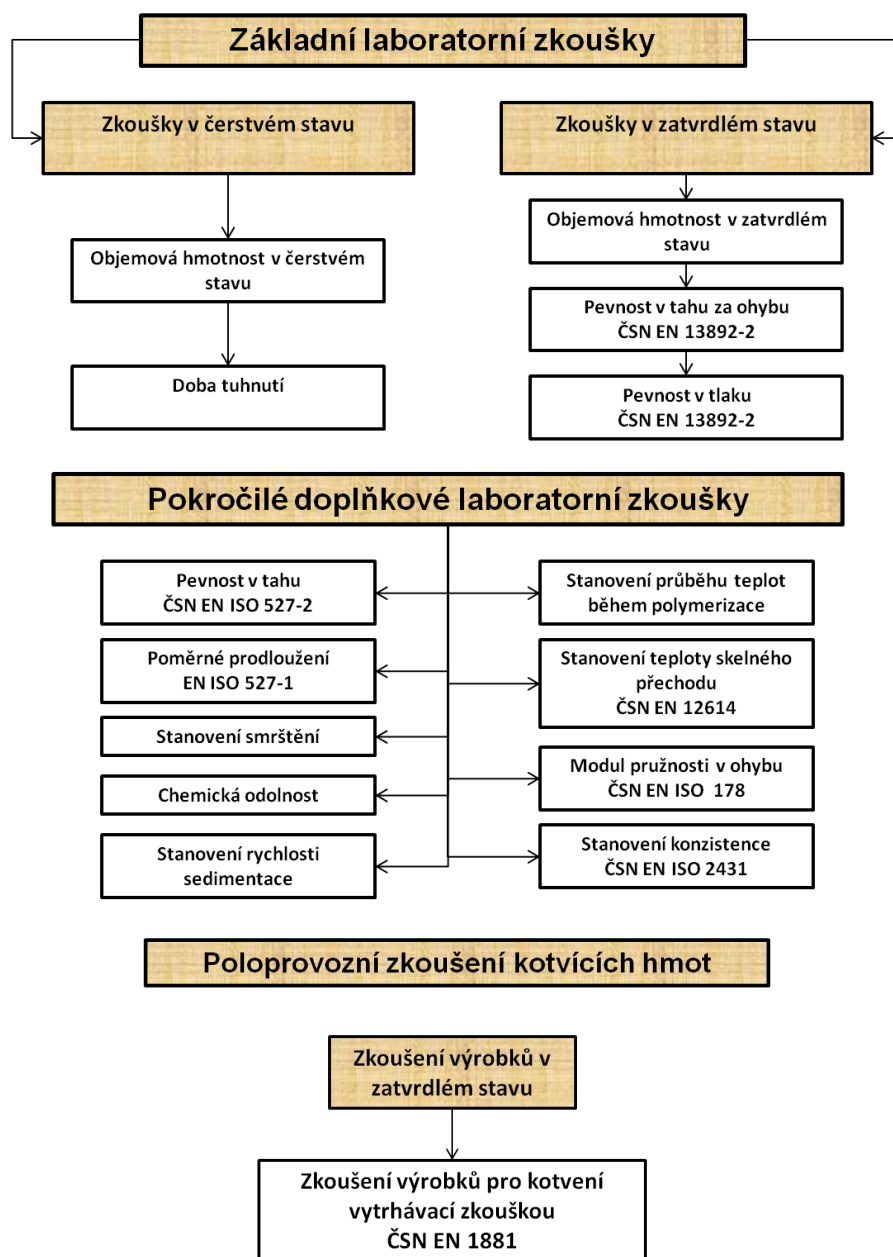
Cílem této etapy bude identifikace vstupních surovin, které budou použity pro vývoj kotvící hmoty. Součástí této etapy bude popis jednotlivých pojiv a plniv z hlediska vlastností a chemického složení. Jako pojivo bude použita epoxidová pryskyřice z důvodu nejlepších vlastností. Jako plnivo budou použity různé druhy odpadních skel, z důvodu využití především druhotných surovin, které budou pomleté na různé frakce. Jako referenční plnivo bude použit křemičitý písek.

## 4.2 Etapa II – Návrh receptur kotevní hmoty vycházející z jejich budoucí aplikace



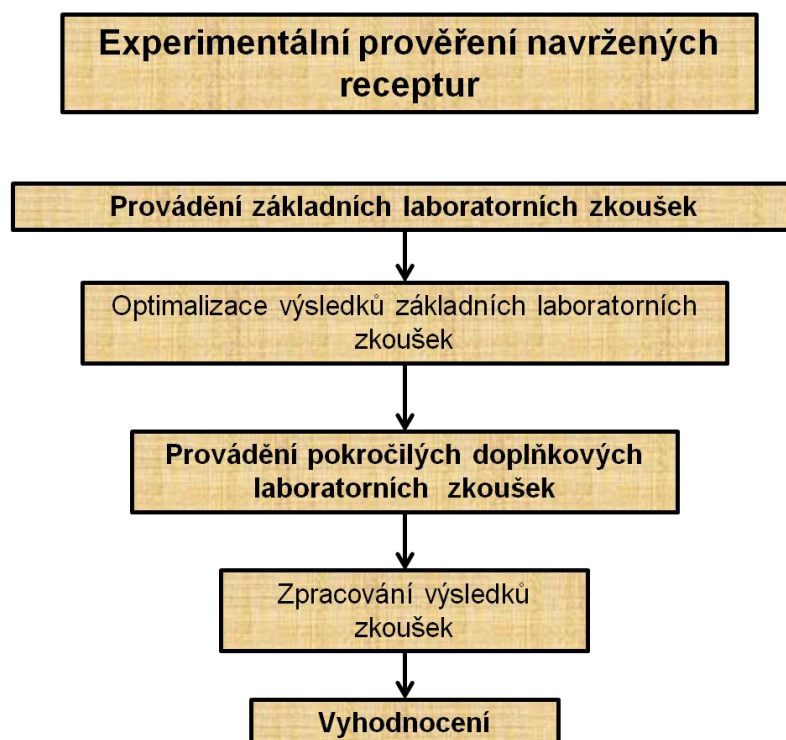
Cílem této etapy bude návrh základních receptur z vybraných primárních a druhotných surovin. Tyto receptury budou navrženy na základě požadavků vycházejících z budoucí aplikace vyvíjených hmot. Snahou bude navrhnout takové receptury, aby výsledná hmota měla co nejvyšší pevnosti, minimální smrštění, chemickou a tepelnou odolnost. Mezi další požadavky patří dobrá zpracovatelnost a vysoká rychlost tuhnutí a tvrdnutí. Důraz bude kladen také na dosažení vysokého stupně plnění vybranými druhotnými surovinami.

### 4.3 Etapa III – Návrh metodiky zkoušení polymerních kotvících hmot



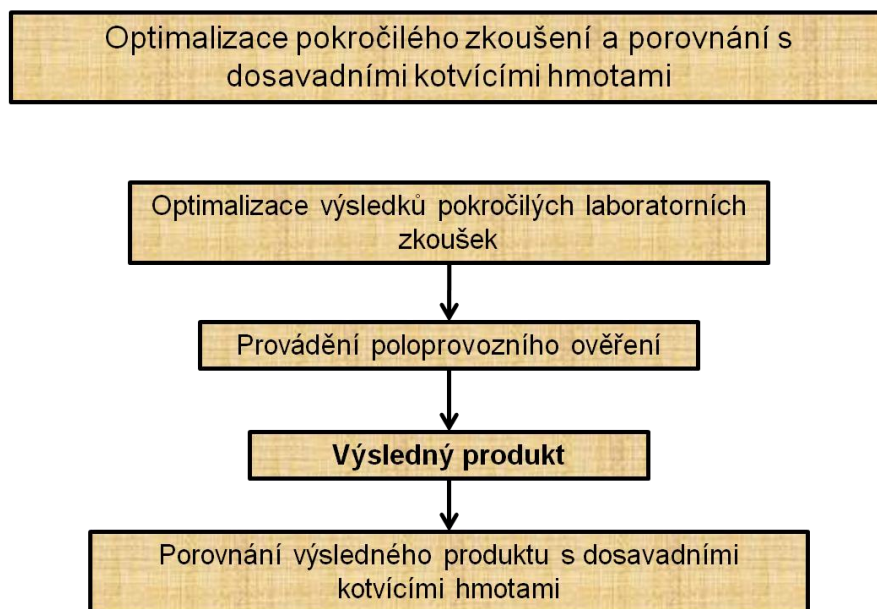
Cílem této etapy bude návrh zkoušek, které budou prováděné v rámci experimentálního prověření navržených receptur v navazující etapě. Nejprve se provede základní zkoušení na všech navržených recepturách, které bude zahrnovat zkoušky jako např. stanovení pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu. Na základě optimalizace výsledků základního zkoušení se vyberou nejlepší receptury, na kterých budou provedeny pokročilé zkoušky. Na základě závěrečné optimalizace se vyberou receptury, z kterých budou připraveny kotvící hmoty na poloprovozní ověření zahrnující nejdůležitější zkoušku pro tyto hmoty – zkoušku vytržení.

#### 4.4 Etapa IV – Experimentální prověření navržených receptur



Tato etapa se bude zabývat experimentálním prověřením navržených receptur. Nejprve budou provedeny navržené základní laboratorní zkoušky na všech navržených recepturách. Po provedení základních zkoušek bude provedena optimalizace výsledků a nejlepší receptury budou dále podrobeny pokročilému zkoušení. Součástí této etapy je fotodokumentace z provádění jednotlivých zkoušek a grafické vyhodnocení.

#### 4.5 Etapa V – Optimalizace výsledků pokročilého zkoušení s následným provedením poloprovozního ověření a porovnáním vlastností s dosud používanými kotvícími hmotami



V poslední, páté etapě bude provedena optimalizace receptur, které prošly základním a také pokročilým zkoušením a byly vybrány jako nejvhodnější pro přípravu nové progresivní kotvící polymerní hmoty. Na základě provedené optimalizace bude vybrána nejlepší receptura, ze které lze připravit kotvící hmotu s takovými vlastnostmi, že bude svými vlastnostmi srovnatelná s jinými v současnosti na trhu dostupnými kotvícími hmotami, případně bude vykazovat ještě lepší vlastnosti. Tato kotvící hmota bude následně použita pro poloprovozní ověření. Závěrem této etapy bude provedeno celkové zhodnocení – porovnání vlastností této nově vyvinuté progresivní hmoty s jinými v současnosti nejvíce využívanými polymerními kotvícími hmotami.

## 5 PRAKTICKÁ ČÁST

### 5.1 ETAPA I – Identifikace vstupních surovin

V této první etapě práce jsou uvedeny a popsány všechny suroviny, které jsou dále použity v experimentální části. Jednotlivé plniva i pojiva jsou podrobně popsány z hlediska fyzikálně mechanických vlastností, chemického složení, granulometrie a způsobu předúpravy.

#### 5.1.1 Plnivo

Na základě optimalizace vstupních surovin v předchozí bakalářské práci [1] byly jako plnivo do vyvíjené kotvící hmoty vybrány – křemičitý písek Dorsilit, odpadní slévárenský písek, čtyři druhy odpadního skla a uhlíkové nanotrubičky. Křemičitý písek Dorsilit byl vybrán jako referenční plnivo. Odpadní skla a odpadní slévárenský písek byly vybrány jako plnivo především z důvodu vysokého obsahu  $\text{SiO}_2$  a možnosti úpravy na požadovanou granulometrii.  $\text{SiO}_2$  se vyznačuje velmi dobrou chemickou odolností a výbornými fyzikálně mechanickými vlastnostmi.

##### 5.1.1.1 Primární suroviny

#### KŘEMIČITÝ PÍSEK DORSILIT ISG A1

Tento křemičitý písek (viz. Obr. č. 1) je připravován z vysušených písků Dorsilit v odstupňovaných zrnitostech. Tento písek umožňuje ve směsi s pryskyřicemi vytvořit co největší hustotu, čímž zmenšuje spotřebu pryskyřice a zvyšuje výsledné pevnosti. Tento písek je dokonale čistý a má ideální kulatý tvar zrn. Použití tohoto písku usnadní přípravu a míchání jednotlivých frakcí a zamezí případnému nevhodnému složení frakcí. Tento křemičitý písek je frakce 0,06–1,5 mm a je možné ho použít jako plnivo do malt, stěrek, epoxidových pryskyřic a polymerbetonů. Měrná hmotnost tohoto písku je  $2660 \text{ kg/m}^3$ . [13]

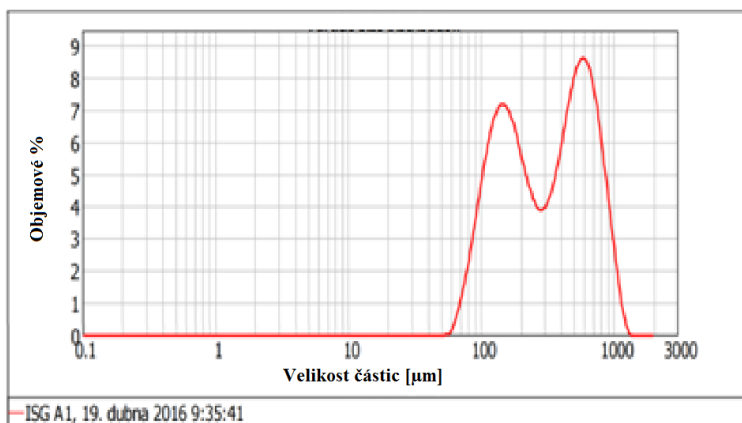
Tabulka č. 10 - Průměrné chemické složení křemičitého písku Dorsilit:

Jednotlivé oxidy	Obsah [%]	Jednotlivé oxidy	Obsah [%]
$\text{SiO}_2$	99,5	$\text{K}_2\text{O}$	0,22
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,61	$\text{Na}_2\text{O}$	0,029
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,028	$\text{Li}_2\text{O}$	0,001
$\text{CaO}$	0,038	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,004
$\text{MgO}$	0,01	$\text{BaO}$	0,013
$\text{TiO}_2$	0,031	$\text{ZrO}_2$	0,008
$\text{MnO}$	0,001	$\text{PbO}$	0,02

**Granulometrie:** 45 % 0,315–0,63 mm      50 % 0,1–0,315 mm      5 % 0–0,1 mm



Obr. č. 1 Křemičitý písek Dorsilit



Obr. č. 2 Distribuční křivka písku Dorsilit frakce 0–0,63 mm

### 5.1.1.2 Druhotné suroviny:

#### 1) AUTOSKLO

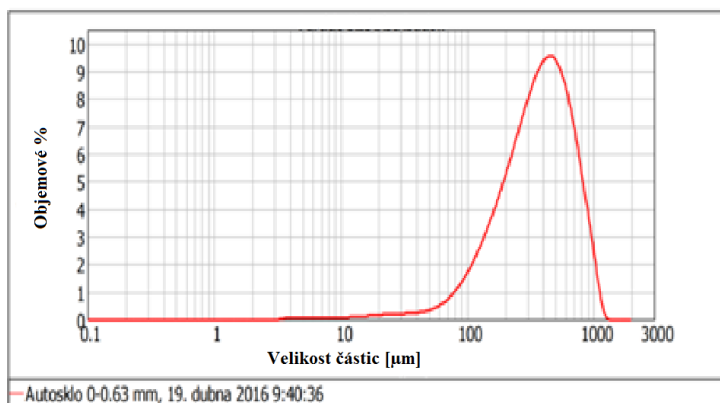
Příprava autoskla není jednoduchá, protože čelní autosklo obsahuje bezpečnostní fólii, pryskyřici nebo tónovací pokovení (viz. Obr. č. 5). Autosklo také může obsahovat kamery, antény, senzory, nebo vyhřívací dráty. Pro použití autoskla jako plniva se nejdříve z autoskla musí odstranit všechny nežádoucí složky jako je fólie, pryskyřice, tónovací pokovení, zbytky těsnicí gumy, a poté se autosklo podrtí na drtiči na požadovanou frakci. Experimentálně zjištěná hustota použitého autoskla je  $2540 \text{ kg/m}^3$ . Hustota všech plniv byla zjišťována přístrojem Gas pycnometer AccuPyc II 1340 ve výzkumném centru AdMaS.

Tabulka č. 11 – Průměrné chemické složení autoskla:

Jednotlivé oxidy	Obsah [%]	Jednotlivé oxidy	Obsah [%]
SiO <sub>2</sub>	69,16	K <sub>2</sub> O	0,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,69	Na <sub>2</sub> O	12,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,14	Li <sub>2</sub> O	0,004
CaO	9,19	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,005
MgO	3,71	BaO	0,17
TiO <sub>2</sub>	0,03	ZrO <sub>2</sub>	0,029
ZnO	0,01	PbO	0,02
MnO	0,006		

**Granulometrie:** 45 % 0,315–0,63 mm      50 % 0,1–0,315 mm      5 % 0–0,1 mm





Obr. č. 3 Distribuční křivka autoskla frakce 0–0,63 mm



Obr. č. 4 Autosklo frakce 0–0,63 mm



Obr. č. 5 Autosklo

Obr. č. 6 Jemně mleté autosklo frakce  $\leq 0,063$  mm

## 2) SKLO Z VÝROBY SKLOVINY SIMAX

Jedná se o čiré, tvrdé borokřemičité sklo (viz. Obr. č. 8) s vynikající chemickou a tepelnou odolností až do 300 °C. Odolává účinkům vody a vodních par, kyselinám, roztokům solí a je relativně odolné vůči alkáliím. Jediné chemikálie, které sklo rozleptávají nebo korodují, jsou: kyselina fluorovodíková, koncentrovaná kyselina trihydrogenfosforečná a koncentrované horké alkalické roztoky. Sklo Simax se používá pro výrobu technického a laboratorního skla, varného skla a průmyslových aparatur (viz. Obr. č. 7). [22]

### Chemické složení:

80,3 % $\text{SiO}_2$	13 % $\text{B}_2\text{O}_3$
2,4 % $\text{Al}_2\text{O}_3$	4,3 % $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$

### Mechanické vlastnosti:

Pevnost v tlaku	100 MPa
Pevnost v tahu za ohybu	7 MPa
Modul pružnosti	63,2 GPa

### Fyzikální vlastnosti: [88]

Hustota	2280 $\text{kg/m}^3$
Součinitel teplotní délkové roztažnosti	$3,35 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

**Granulometrie** - frakce  $\leq 0,063$  mm



Obr. č. 7 Laboratorní sklo

Obr. č. 8 Jemně mleté sklo Simax frakce  $\leq 0,063$  mm

### 3) SKLO ZE SOLÁRNÍCH PANELŮ

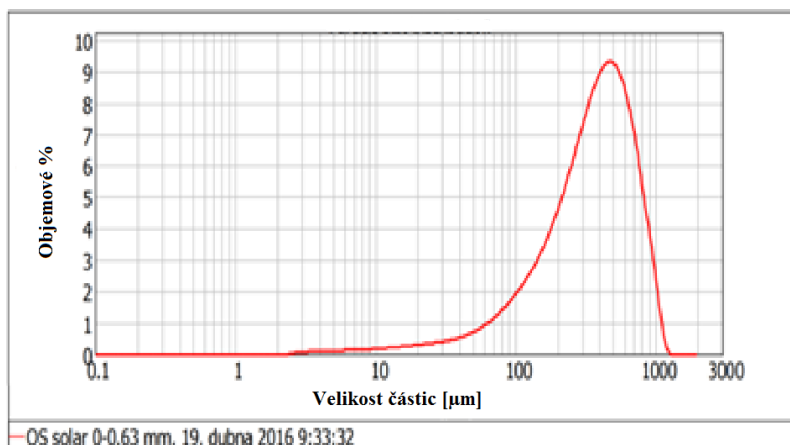
Před vlastním použitím se ze skla z panelů (viz obr. č. 10) musí nejdříve odstranit bezpečnostní fólie. Odstraňování probíhá buď termickou metodou, kdy se z panelu za vysokých teplot odpaří polymerové části a sklo a zbylé části se ručně odstraní, nebo se používá mechanicko-chemická metoda, která je založena na mechanickém drcení panelů a následné separaci materiálů a loužení. [23]

**Typ QS Solar** – tento typ solárních panelů je jedním z nejrozšířenějších a byl prvně vyroben v Šanghaji. Tyto panely obsahují především amorfní křemík. Experimentálně zjištěná hustota tohoto skla je  $2510 \text{ kg/m}^3$ .

Tabulka č. 12 – Průměrné chemické složení skla ze solárních panelů typu QS solar:

Jednotlivé oxidy	Obsah [%]	Jednotlivé oxidy	Obsah [%]
SiO <sub>2</sub>	71	K <sub>2</sub> O	0,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,49	Na <sub>2</sub> O	12,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	Li <sub>2</sub> O	0,001
CaO	8,45	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,005
MgO	4,04	BaO	0,009
TiO <sub>2</sub>	0,02	ZrO <sub>2</sub>	0,009
MnO	0,006	SrO	0,005

**Granulometrie:** 45 % 0,315–0,63 mm      50 % 0,1–0,315 mm      5 % 0–0,1 mm



Obr. č. 9 Distribuční křivka skla QS solar frakce 0–0,63 mm



Obr. č. 10 Sklo ze solárních panelů



Obr. č. 11 Jemně mleté sklo QS solar frakce 0–0,63 mm

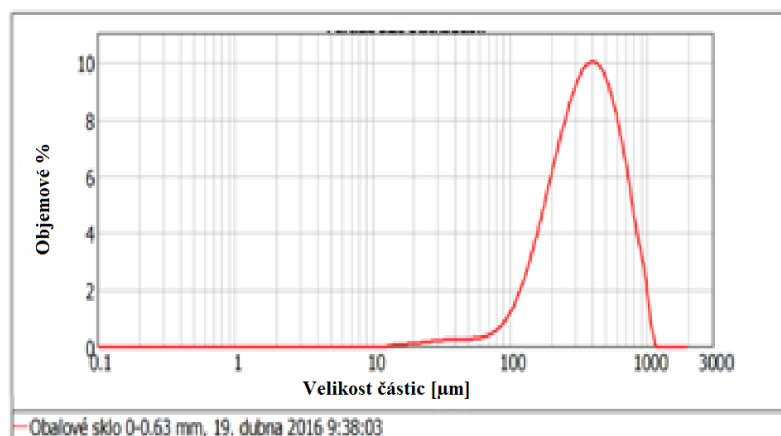
#### 4) OBALOVÉ SKLO

Jako plnivo lze také použít odpadní skleněné láhve nebo sklenice (viz. Obr. č. 13), které se musí nejdříve očistit od hrubých nečistot a poté mechanicky očistit od nežádoucích materiálů jako je papír apod. Poté se sklo drtí a mele na požadovanou frakci. Experimentálně zjištěná hustota tohoto skla je  $2530 \text{ kg/m}^3$ .

Tabulka č. 13 – Průměrné chemické složení obalového skla [24]

Jednotlivé oxidy	Obsah [%]
$\text{SiO}_2$	70–74
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1–4
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,04
$\text{CaO}$	5–11
$\text{MgO}$	1–3
$\text{TiO}_2$	0,01
$\text{SO}_3$	0,20
$\text{Na}_2\text{O}$	12–16
$\text{K}_2\text{O}$	0,30

**Granulometrie:**      45 % 0,315–0,63 mm      50 % 0,1–0,315 mm      5 % 0–0,1 mm



Obr. č. 12 Distribuční křivka obalového skla frakce 0–0,63 mm



Obr. č. 13 Obalové sklo



Obr. č. 14 Jemně mleté obalové sklo bílé frakce 0–0,63 mm

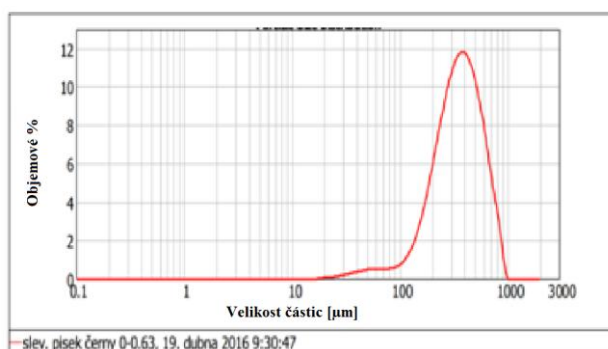
## 5) ODPADNÍ SLÉVÁRENSKÝ PÍSEK

Tento písek (viz. Obr. č. 15) je odpadem ze slévárenských provozů, kde se používá čistý slévárenský písek pro vytváření forem. Po odlití a zatuhnutí se forma rozbije a písek se třídí a ukládá do zásobníků. Experimentálně zjištěná hustota tohoto písku je  $2680 \text{ kg/m}^3$ .

**Granulometrie:** 45 % 0,315–0,63 mm      50 % 0,1–0,315 mm      5 % 0–0,1 mm



Obr. č. 15 Odpadní slévárenský písek

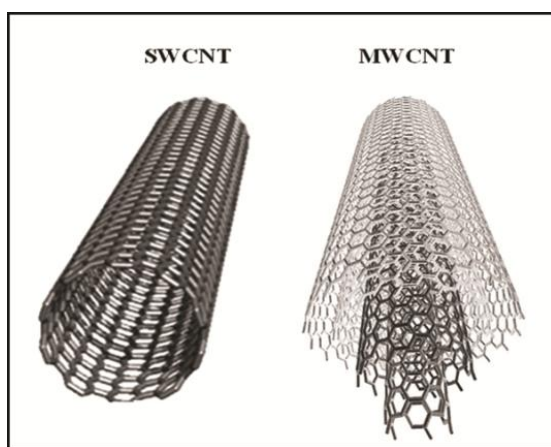


Obr. č. 16 Distribuční křivka slévárenského písku frakce 0–0,63 mm

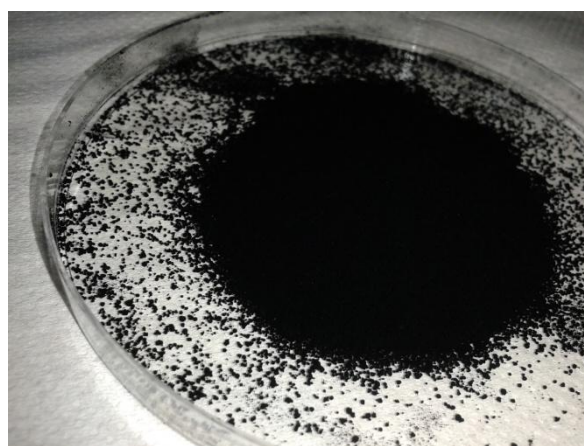


### 5.1.2 Rozptýlená nanovýztuž:

**Uhlíkové nanotrubičky (CNT)** – jedná se o trubičky o průměru 1 nm. Tyto trubičky jsou přibližně 100 krát silnější než ocel a přitom váží asi jen šestinu hmotnosti oceli. Mají velice zajímavé elektronické, magnetické a mechanické vlastnosti. Jsou vysoce elektricky a tepelně vodivé. Grafitová vrstva trubičky je tvořena šestiúhelníky, navzájem spojenými ve vrcholech a srolována do tvaru válce. CNT mají mnoho struktur, které se liší délkou, tloušťkou a počtem vrstev. Jednovrstvé nanotrubičky se označují SWCNT a vícevrstvé MWCNT (viz Obr. č. 17 a 18). Bylo zjištěno, že použití uhlíkových nanotrubiček do epoxidových matric zvyšuje pevnost v tahu a houževnatost výsledné hmoty. [25] – [19]



Obr. č. 17 Uhlíkové nanotrubičky SWCNT a MWCNT



Obr. č. 18 Uhlíkové nanotrubičky SWCNT

### 5.1.3 Polymerní pojiva:

Jako pojivo budou použity epoxidové pryskyřice z důvodu nejlepších dosahovaných vlastností, které byly zjišťovány v rámci řešení v teoretické části (viz. Tabulka č. 1). Složka A představuje samotnou nevytvrzenou epoxidovou pryskyřici a složka B je tvrdidlo na polyaminové bázi.

#### PKM1 Polymerní kotvící hmota

Jedná se o vysoce viskózní dvoukomponentní bezrozpouštědlovou hmotu na epoxidové bázi.

Chemické složení:

**Složka A** – epoxidová pryskyřice, (alkoxymethyl)oxiran (alkyl C12-C14), solventní nafta (ropná), lehká aromatická

**Složka B** – 2, 4, 6-tris (dimethylaminomethyl)fenol

Technická a zpracovatelská data:

- zpracovatelná při teplotách podkladu od +5 °C do +30 °C,

- nejnižší doporučená teplota pro aplikaci je +12 °C,
- během aplikaci a vytvrzování nesmí přijít pryskyřice do kontaktu s vodou,
- specifická hmotnost při 20 °C 1,1 kg/l,
- zpracovatelnost při 20 °C max. 5 minut,
- plně vytvrzena 7 dní,
- mísící poměr obou složek hmotnostně 1:1.

### PKM 2 Polymerní kotvící hmota

Jedná se o nízkoviskózní dvoukomponentní bezrozpouštědlovou hmotu na epoxidové bázi.

Chemické složení:

**Složka A** – epoxidová pryskyřice, (alkoxymethyl)oxiran (alkyl C12-C14), solventní nafta (ropná), lehká aromatická

**Složka B** – benzylalkohol, polymer s benzenaminem, hydrogenovaný formaldehyd, 2,4,6-tris(dimethylaminomethyl)fenol, 4,4-methylenbis (cyklohexylamin), N,N-dimethylpropan-1,3-diamin

Technická a zpracovatelská data:

- zpracovatelná při teplotách podkladu od +5 °C do +30 °C,
- nejnižší doporučená teplota pro aplikaci je +12 °C,
- během aplikaci a vytvrzování nesmí přijít pryskyřice do kontaktu s vodou,
- specifická hmotnost při 20 °C 1,15 kg/l,
- zpracovatelnost cca 13 minut,
- schnutí při 20 °C 2–24 hodin,
- plně vytvrzena po 7 dnech,
- mísící poměr obou složek je 1,9:1.

### 3) PKM3 Polymerní pojivová hmota na epoxidové bázi

Jedná se o nízkoviskózní dvoukomponentní bezrozpouštědlovou hmotu na epoxidové bázi.

Chemické složení:

**Složka A** – epoxidová pryskyřice, (alkoxymethyl)oxiran (alkyl C12-C14), solventní nafta (ropná), lehká aromatická

**Složka B** – benzylalkohol, polymer s benzenaminem, hydrogenovaný formaldehyd, 2,4,6-tris(dimethylaminomethyl)fenol, 4,4-methylenbis (cyklohexylamin)

- Mísící poměr obou složek hmotnostně je 2,3:1

Tato část práce shrnula veškeré suroviny, se kterými se dál bude pracovat na vývoji progresivní kotvící hmoty. Jsou zde uvedeny některé vlastnosti a chemická složení jednotlivých plniv a pojiv. Na základě těchto údajů bude v následující etapě proveden návrh receptur, které budou dále zkoušeny.

## 5.2 ETAPA II – Návrh receptur kotevní hmoty vycházející z jejich budoucí aplikace

Cílem této etapy je definování požadavků na vyvíjenou hmotu a vytvoření několika základních receptur z výše zvolených druhů plniv a pojiv na epoxidové bázi. Vzhledem k tomu, že vyvíjená kotvící hmota bude určena do náročných průmyslových provozů a náročných expozičních podmínek, pro kotvení těžkých konstrukcí, strojů a zařízení, tak jsou na tuto hmotu kladeny přísné požadavky, které by měla nová vyvinutá kotvící hmota splňovat.

### 5.2.1 Požadavky na vlastnosti kotevní hmoty

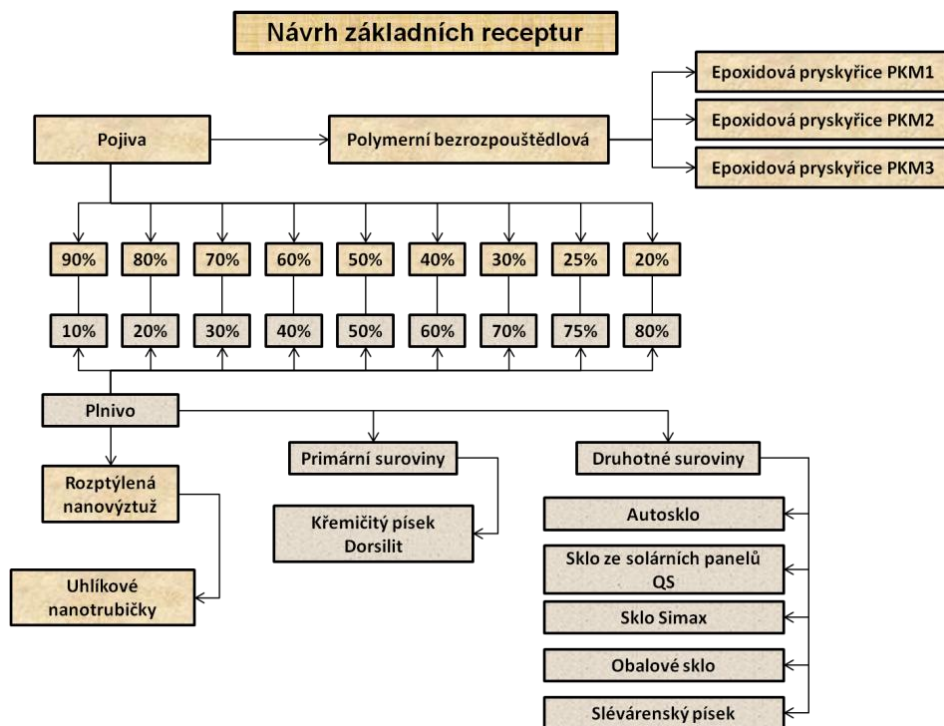
Na tomto diagramu jsou uvedeny důležité požadavky na vyvíjenou kotvící hmotu vycházející z budoucí aplikace a použití kotvící hmoty, které je popsáno výše.



Nejdůležitějšími požadavky na kotvící hmoty jsou vysoká kotvící síla, minimální smrštění, aby nedošlo k uvolnění hmoty v otvoru, vysoká rychlost tuhnutí a tvrdnutí a chemická odolnost.

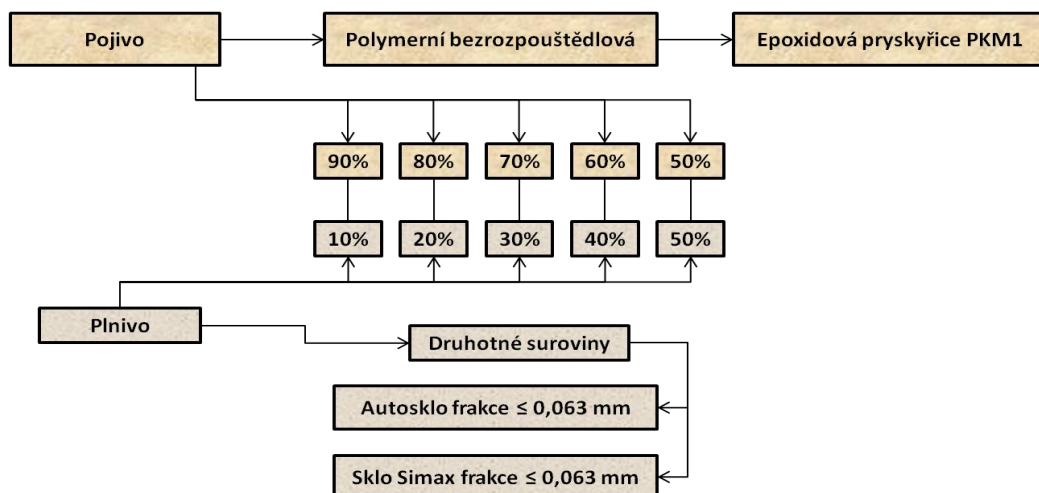
## 5.2.2 Návrh složení receptur

Následující diagram znázorňuje navržené procentuální poměry mísení všech tří pojiv na bázi epoxidové pryskyřice se všemi vybranými druhy plniv.



### 5.2.2.1.1 Diagram navržených receptur hmoty PKM1 s plnivem frakce $\leq 0,063$ mm

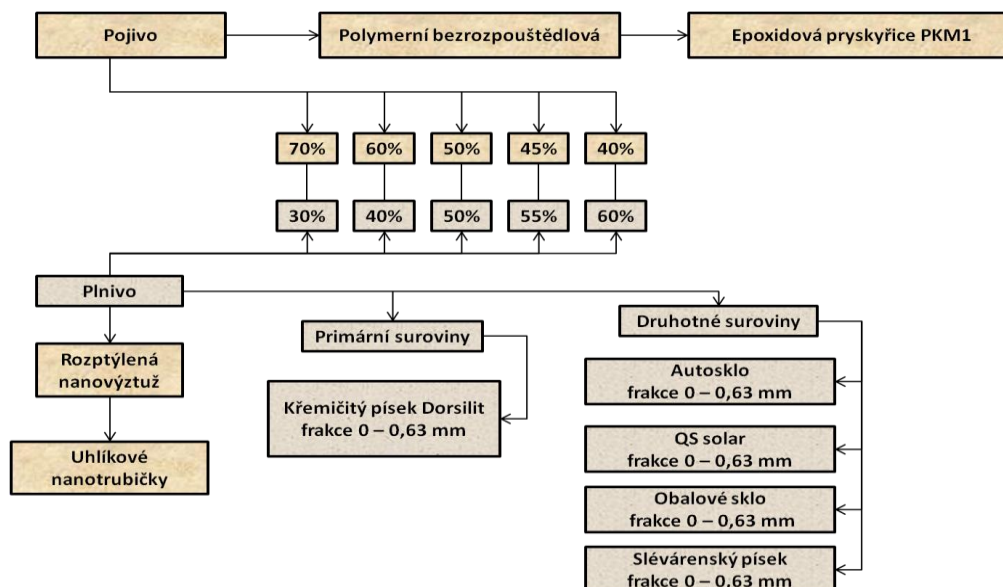
Na tomto diagramu je zobrazen návrh receptur s použitím pojiva PKM1 s autosklem a sklem Simax frakce  $\leq 0,063$  mm. Vzhledem k vysoké viskozitě hmoty PKM1 je zvoleno procento plnění od 10 % do 50 %.





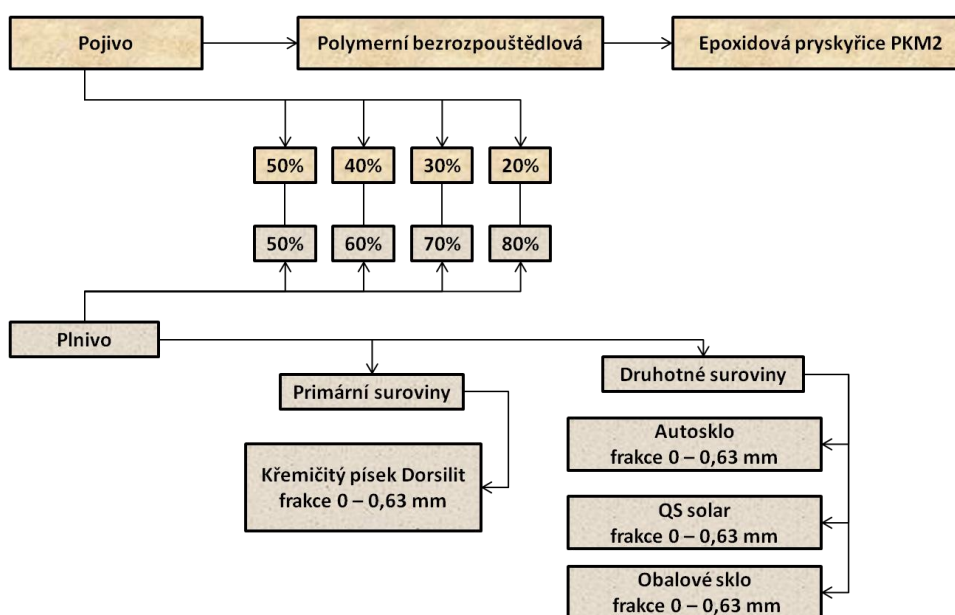
### 5.2.2.2 Diagram navržených receptur hmoty PKM1 s plnivý frakce 0 – 0,63 mm

Na uvedeném digramu je zobrazen návrh receptur hmoty PKM1 s plnivý frakce 0 – 0,63 mm. Vzhledem k vysoké viskozitě hmoty PKM1 je zvoleno maximální procento plnění 60 %.



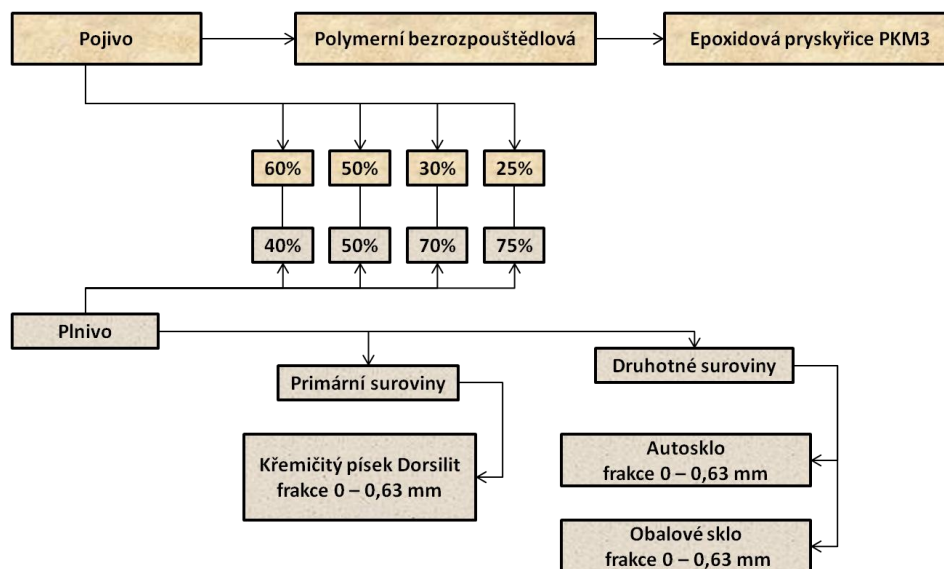
### 5.2.2.3 Diagram navržených receptur hmoty PKM2 s plnivý frakce 0 – 0,63 mm

Následující diagram představuje návrh receptur hmoty PKM2 s plnivý frakce 0 – 0,63 mm. Vzhledem k nízké viskozitě této hmoty je zvoleno procento plnění od 50 % do 80 %.



#### 5.2.2.4 Diagram navržených receptur hmoty PKM3 s plnivý frakce 0 – 0,63 mm

Na tomto diagramu je zobrazen návrh receptur hmoty PKM3 s plnivý frakce 0 – 0,63 mm. Vzhledem k nízké viskozitě této hmoty je zvoleno procento plnění od 40 % do 75 %.



V této etapě byly stanoveny požadavky na vyvíjenou kotvící hmotu, které vycházely z budoucí aplikace této hmoty. Důraz byl kladen na vysoké pevnosti, vysokou chemickou odolnost, minimální smrštění a dobrou odolnost vůči vysokým teplotám. Na základě těchto požadavků byly navrženy receptury, které byly vytvořeny ze surovin uvedených v první etapě.

### 5.3 ETAPA III – Návrh metodiky zkoušení polymerních kotvících hmot

Tato část práce obsahuje návrh metodiky zkoušení vyvíjených polymerních kotvících hmot. Metodika se skládá ze základních, pokročilých doplňkových a poloprovozních zkoušek. Jsou zde uvedené normy, které stanovují přesné postupy zkoušení a jsou zde také zmíněny postupy, jak se zkoušky prováděly.

#### 5.3.1 Základní zkoušky

Mezi základní zkoušky byly zařazeny tyto níže uvedené zkoušky, které budou prováděny na všech základních recepturách.

**Doba tuhnutí** – doba tuhnutí byla zjišťována experimentálně podle stavu zpracovatelnosti.

**Pevnost v tlaku** ČSN EN 13892-2 Metody zkoušení potěrových materiálů – Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku. Zkouška byla prováděna dle postupu uvedeného v normě.

**Pevnost v tahu za ohybu** ČSN EN 13892-2 Metody zkoušení potěrových materiálů – Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku. Zkouška byla prováděna dle postupu uvedeného v normě.

**Stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu** – Objemová hmotnost v čerstvém stavu byla zjištěna výpočtem z hodnot hmotností jednotlivých hmot nalitých do kelímků o objemu 0,04 l.

**Stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu** EN ISO 845 – Objemová hmotnost byla stanovena měřením posuvným měřidlem a vážením s přesností na dvě desetinná místa. Výška a šířka trámečku byla měřena třikrát a délka dvakrát. Výsledná objemová hmotnost byla stanovena z průměrných hodnot.

### 5.3.2 Pokročilé doplňkové laboratorní zkoušky

Těmto pokročilým doplňkovým laboratorním zkouškám budou podrobeny už pouze některé vybrané hmoty s nejlepšími vlastnostmi.

**Stanovení konzistence** ČSN EN ISO 2431 – Stanovení výtokové doby výtokovými pohárky. Zkouška se provádí tak, že se zcela naplní Fordův výtokový pohárek hmotou a zjišťuje se doba výtoku hmoty, podle které se stanoví konzistence.

**Pevnost v tahu** ČSN EN ISO 527-1 Stanovení tahových vlastností – Část 1: Základní principy a ČSN EN ISO 527-2 Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvárené plasty

Zkouška probíhala podle uvedené normy na speciálních zkušebních tělesech. Zatěžování probíhalo rychlostí 5 mm/min. Z naměřených hodnot byly spočítány pevnost v tahu při přetržení, maximální pevnost v tahu, poměrné prodloužení při přetržení a poměrné prodloužení při maximální pevnosti.

**Výpočet jednotlivých charakteristik**

Největší pevnost v tahu, pevnost v tahu při přetržení  $\sigma_T = \frac{F}{b \cdot t}$  [MPa] (1)

Poměrné prodloužení při nejvyšší pevnosti  $\epsilon_p = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100$  [%] (2)

Poměrné prodloužení při přetržení  $\epsilon_{pp} = \frac{\Delta L_{00}}{L_0} \cdot 100$  [%] (3)

Vysvětlení symbolů:

$\sigma_T$ ..... Pevnost v tahu

$\Delta L_0$ ..... Prodloužení

$b$ ..... Šířka vzorku

$\epsilon_{pp}$ ..... Poměrné prodloužení při přetržení

$t$ ..... Tloušťka vzorku

$\epsilon_p$ ..... Poměrné prodloužení při nejvyšší

$F$ ..... Tahová síla

pevnosti

$L_0$ ..... Původní délka

**Poměrné prodloužení** ČSN EN ISO 527-1 Stanovení tahových vlastností – Část 1: Základní principy. Zkouška se provádí dle postupu uvedeného v normě a výsledkem je výpočet poměrného prodloužení.

**Stanovení smrštění** – smrštění se stanovovalo na speciálním přístroji – Tensograf TGF 02 (viz. Obr. č. 19), který funguje na principu měření hodnoty napjatosti zjištěním velikosti síly potřebné k tomu, aby relativní podélná deformace měřeného zkušební tělesa vzhledem k přístroji zůstala nulová. Při teplotních změnách (vzhledem k tomu, že lze roztažnost kovu přístroje uvažovat přibližně rovnu teplotní roztažnosti betonů) odpovídá zjištění napjatosti stavu, jaký je např. při aplikaci podlahoviny na betonovém podkladu. Navržená zkušební metoda respektuje souhrnně komplex všech podstatných veličin ve skutečné závislosti na jejich proměnných, uvažuje skutečné reologické vlastnosti hmoty a odpovídá tak co nejblíže reálnému stavu.



Obr. č. 19 Tensograf TGF 02

**Odolnost proti vysokým teplotám** ČSN EN 12614 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení teploty skelného přechodu polymerů.

**Chemická odolnost** – jedná se o zrychlenou zkoušku chemické odolnosti podle ověřeného zkušební postupu. Zkušební vzorky se připraví nanesením zvolených kotvících hmot na čistá podložní sklíčka a nechají se 7 dní polymerovat v laboratorních podmínkách. Poté se takto připravené sklíčka vloží do skleněných kyvet se zvolenými chemikáliemi na dobu 30 dnů. Vzorky se vytáhnou a kontrolují po 7 a 30 dnech. Po ukončení zkoušky se provede vizuální zhodnocení a následně je materiál zařazen podle hodnotící tabulky (viz. Tab. č. 14) odolnosti materiálu vůči danému chemickému prostředí.

Tabulka č. 14 – Hodnotící systém pro zrychlenou zkoušku chemické odolnosti navržen s ohledem na dosažené výsledky vyvíjených kotvících hmot

Hodnocení	Popis chování hmot v chemickém prostředí
*****	Hmota nevykazuje žádné změny
*****	Odlepení hmoty od sklíčka
*****	Hmota změkla a odlepila se od sklíčka
****	Barevné změny
***	Odlepení hmoty od sklíčka + barevné změny
**	Hmota nabobtnává + odlepení od sklíčka + barevné změny
*	Úplné porušení hmoty – trhliny (ztráta soudržnosti)

**Modul pružnosti** ČSN EN ISO 178 Plasty – stanovení ohybových vlastností. Zkouška se provádí podle normového postupu. Z výsledného grafu se z jeho lineární části vypočítá modul pružnosti v ohybu.

$$\epsilon_{F1} = \frac{6 \cdot s_1 \cdot h_1}{L^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{F1} = \frac{1,5 \cdot F_1 \cdot L_1}{b \cdot h^2} \quad (7)$$

$$\epsilon_{F2} = \epsilon_{F1} + 0,002 \quad (5)$$

$$\sigma_{F2} = \frac{1,5 \cdot F_2 \cdot L_2}{b \cdot h^2} \quad (8)$$

$$S_2 = \frac{\epsilon_{F2} \cdot L^2}{6 \cdot h} \quad (6)$$

$$E_0 = \frac{\sigma_{F2} - \sigma_{F1}}{\epsilon_{F2} - \epsilon_{F1}} \quad (9)$$

Vysvětlení symbolů:

$E_0$ ..... krátkodobý modul pružnosti

$F$ ..... síla odpovídající stlačení

$\epsilon_F$ ..... deformace ohybem

$L$ ..... vzdálenost rozpěr podpor

$\sigma_F$ ..... napětí v ohybu

$b$ ..... šířka vzorku

$S$ ..... stlačení v lineární části

$h$ ..... výška vzorku

**Stanovení průběhu teplot během polymerizace** – po smíchání obou složek s plnivem dohromady se umístí do hmoty termočlánků a sleduje se průběh teplot během polymerizace.

**Stanovení rychlosti sedimentace** - Tato zkouška vychází z podnikové zkoušky firmy Lena Chemical s.r.o. Cílem této zkoušky je zjištění rychlosti sedimentace plniva v polymerní pryskyřici. Pro zkoušku se použijí skleněné zkumavky o průměru 15 mm, které se téměř celé naplní hmotou - složkou A s plnivem. Takto připravené vzorky se ponechají po určitou dobu v laboratorních podmínkách. Po uplynutí této doby se zjišťuje stav sedimentace. Výsledné zhodnocení se provádí dle níže uvedené tabulky č. 15.

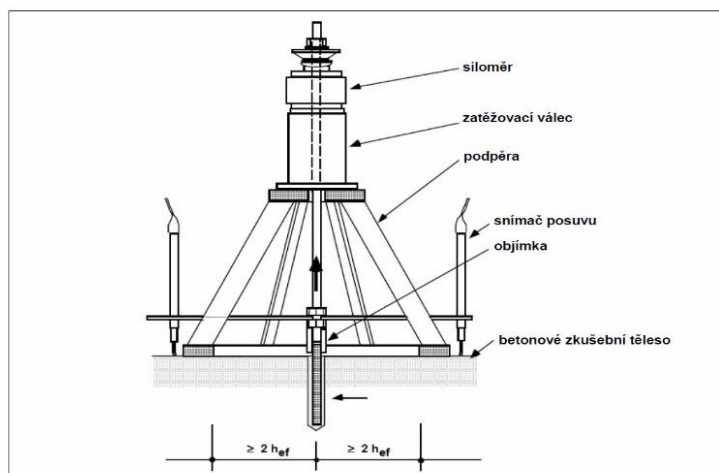
Tabulka č. 15 – Hodnocení sedimentace

Hodnoty	Popis hodnocení
1	Vzorek zůstal bez pozorovatelných změn, žádná známka sedimentace
2	Počátky sedimentace: změna barevného odstínu, náznak separace vrstev
3	Lehce pozorovatelné známky sedimentace pouhým okem (hranice vrstev, barva)
4	Jasně pozorovatelná sedimentace: barva, jasné hranice jednotlivých vrstev, možnost určení separovaných vrstev
5	Výrazná sedimentace, separování jednotlivých složek disperzní soustavy

### 5.3.3 Poloprovozní zkoušení

Tato poloprovozní zkouška se bude provádět na závěr na vybraných nejlepších recepturách.

**Zkouška výrobků pro kotvení vytrhávací zkouškou ČSN EN 1881** Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Zkoušení výrobků pro kotvení vytrhávací zkouškou. Zkouška se provádí podle postupu stanového normou.



Obr. č. 20 – Zařízení pro vytrhávací zkoušku

## 5.4 ETAPA IV – Experimentální prověření navržených receptur

Tato etapa práce se zabývá laboratorním experimentálním prověřením navržených receptur. Součástí této etapy je také vyhodnocení výsledků jednotlivých zkoušek, jejich grafické zpracování, fotodokumentace provádění, celkové zhodnocení a optimalizace výsledků.

### 5.4.1 Zkoušení kotvících hmot PKM1 s plnivem frakce $\leq 0,063$ mm

Nejprve byly zkoušeny kotvící hmoty s jemně mletým plnivem frakce  $\leq 0,063$  mm. Jako plnivo bylo použito jemně mleté autosklo a sklo Simax a jako pojivo byla použita hmota PKM1. Cílem bylo zjistit, zdali takhle jemně mleté plnivo bude tou správnou volbou pro další využití.

Bylo zvoleno hmotnostní procento plnění 10 % – 50 % plniva z celkové hmotnosti směsi. Bylo zjištěno, že hmotnostně 50 % plniva je maximum, protože větší množství plniva by nebylo možno v pryskyřici dobře rozmíchat z důvodu vysoké viskozity epoxidové pryskyřice. Tímto by docházelo k heterogenitě materiálu, což by způsobovalo vznik shluků a vytvářely by se nebezpečné zóny, ve kterých by mohlo docházet k porušení. Tato polymerní kotvící hmota má velmi krátkou dobu tuhnutí. Po 10–15 minutách dochází k úplnému vytvrzení hmoty, přičemž vytvrzování je doprovázeno poměrně silnou exotermickou reakcí. Při smíchávání jednotlivých složek dohromady došlo k vnesení vzduchu do hmoty, což způsobilo vznik vzduchových bublin což je vidět například na obr. č. 21 a 22.



Obr. č. 21 PKM1 + 10 % Simax frakce  $\leq 0,063$  mm



Obr. č. 22 PKM1 + 50 % Simax frakce  $\leq 0,063$  mm



Obr. č. 23 PKM1 + 10 % autosklo frakce  $\leq 0,063$  mmObr. č. 24 PKM1 + 50 % autosklo frakce  $\leq 0,063$  mm

Z kotvící hmoty jsme vytvořili trámečky 20 x 20 x 100 mm, na kterých jsme po 7 dnech stanovovali objemovou hmotnost v zatvrdlém stavu, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku.



Obr. č. 25 Vzorek po zkoušce pevnosti v tlaku



Obr. č. 26 Vzorek při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu

### Výsledné hodnoty

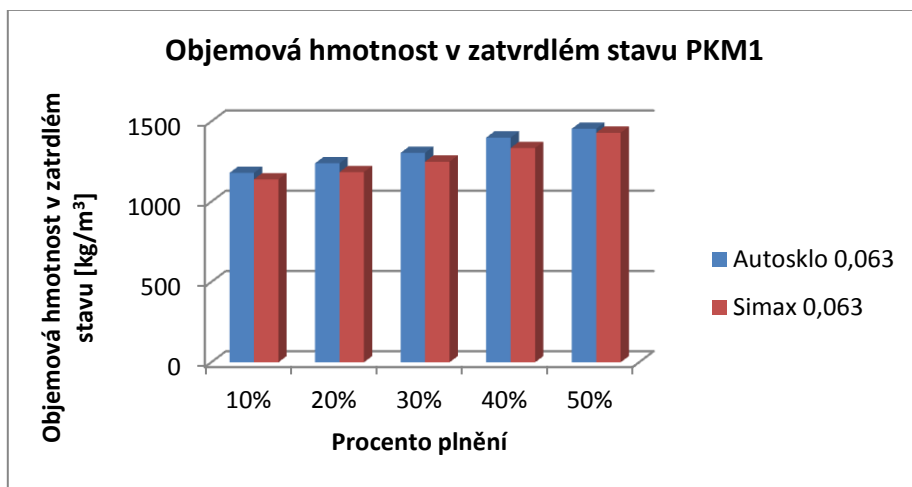
Tabulka č. 16 – Výsledné průměrné hodnoty pevností a objemové hmotnosti

Označení vzorku	Ø Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Ø Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Ø Pevnost v tlaku [MPa]
PKM1 Simax 0,063 10 %	1140	51,6	25,8
PKM1 Simax 0,063 20 %	1185	45,3	25,0
PKM1 Simax 0,063 30 %	1250	47,3	32,5
PKM1 Simax 0,063 40 %	1335	53,7	97,9
PKM1 Simax 0,063 50 %	1430	44,9	74,2
PKM1 Autosklo 0,063 10 %	1180	50,3	25,0
PKM1 Autosklo 0,063 20 %	1240	50,0	57,5
PKM1 Autosklo 0,063 30 %	1305	49,4	70,4
PKM1 Autosklo 0,063 40 %	1400	42,8	69,6
PKM1 Autosklo 0,063 50 %	1455	43,7	83,3

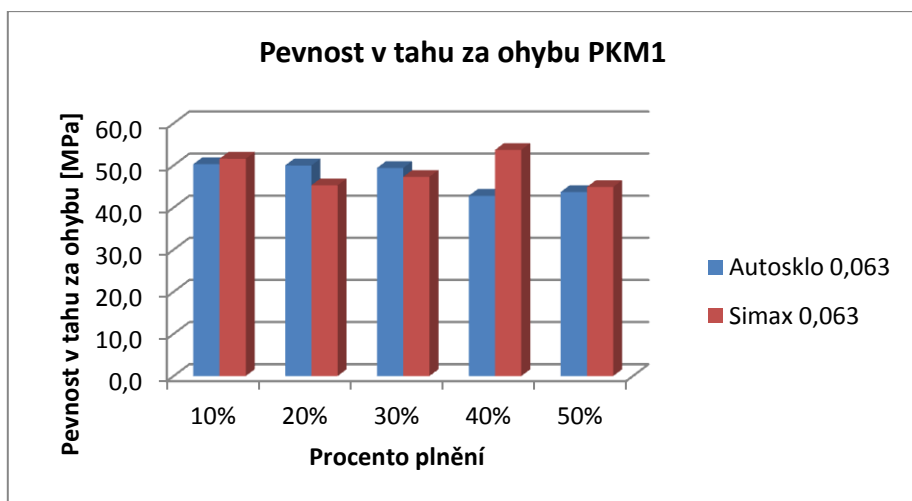


## Grafické vyhodnocení

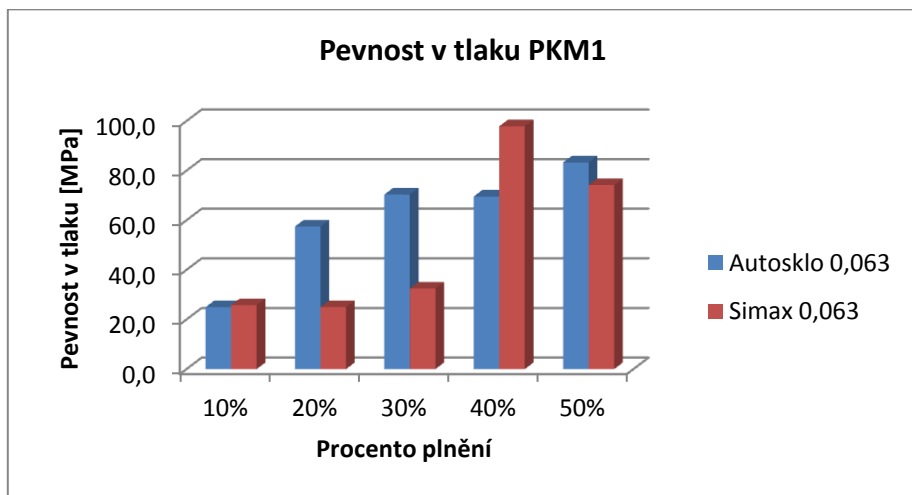
Na následujících grafech je zobrazeny závislosti objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu, pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku na druhu skla a různém procentu plnění.



Obr. č. 27 Graf závislosti objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu na procentu plnění



Obr. č. 28 Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na procentu plnění



Obr. č. 29 Graf závislosti pevnosti v tlaku na procentu plnění

V rámci základního zkoušení bylo zjištěno, že množství plniva má výrazný vliv na výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti hmoty. Z grafů je vidět, že kromě různého procenta plnění, se vlastnosti mění i v závislosti na druhu použitého plniva. Celkově z toho vyplývá, že nejlepší vlastnosti vykazují hmoty se 40 % plnění. Ale vzhledem k vysoké viskozitě hmoty se plnivo frakce  $\leq 0,063$  mm nejeví jako vhodné, z důvodu obtížného smísení všech složek a z důvodu vysoké houževnatosti vytvrzené hmoty. Výbornou vlastností této hmoty je ale její velice krátká doba tuhnutí, která je v našem případě velmi důležitá. Lze předpokládat, že použitím hrubšího plniva v této hmotě se dosáhnou lepší výsledky. Tento předpoklad je ověřen v následující kapitole.

#### 5.4.2 Zkoušení kotvících hmot PKM1, PKM2 a PKM3 s různým plnivem frakce 0–0,63 mm

Tato část se zabývá prováděním jednotlivých zkoušek na navržených recepturách s různými plnivy frakce 0–0,63 mm a se třemi různými pojivovými složkami.

##### 5.4.2.1 Základní zkoušení – PKM1

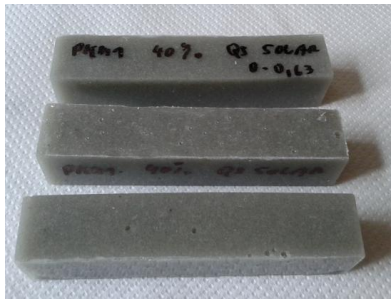
Tyto zkoušky byly prováděny podle normy ČSN EN 13892-2 na normových trámečcích 20 x 20 x 100 mm. Pro tyto zkoušky byly použity jako plnivo autosklo (viz. Obr. č. 36 – 37), obalové sklo (viz. Obr. č. 34 – 35), QS solar (viz. Obr. č. 32 – 33), křemičitý písek Dorsilit (viz. Obr. č. 30 – 31) a odpadní slévárenský písek (viz. Obr. č. 39 – 40) se stanovenou frakcí 0-0,63 mm.



Obr. č. 30 PKM1 + 40 % Dorsilit



Obr. č. 31 PKM1 + 60 % Dorsilit



Obr. č. 32 PKM1 + 40 % QS solar



Obr. č. 33 PKM1 + 60 % QS solar



Obr. č. 34 PKM1 + 40 % Obal. sklo



Obr. č. 35 PKM1 + 60 % Obal. sklo



Obr. č. 36 PKM1 + 40 % autosklo



Obr. č. 37 PKM1 + 60 % autosklo



Obr. č. 38 Ref. hmota PKM1



Obr. č. 39 PKM1 + 40 % Slév. písek



Obr. č. 40 PKM1 + 60 % Slév. písek



Obr. č. 41 Průběh zkoušky pevnosti v tahu za ohybu



Obr. č. 42 Vzorek po zkoušce pevnosti v tlaku

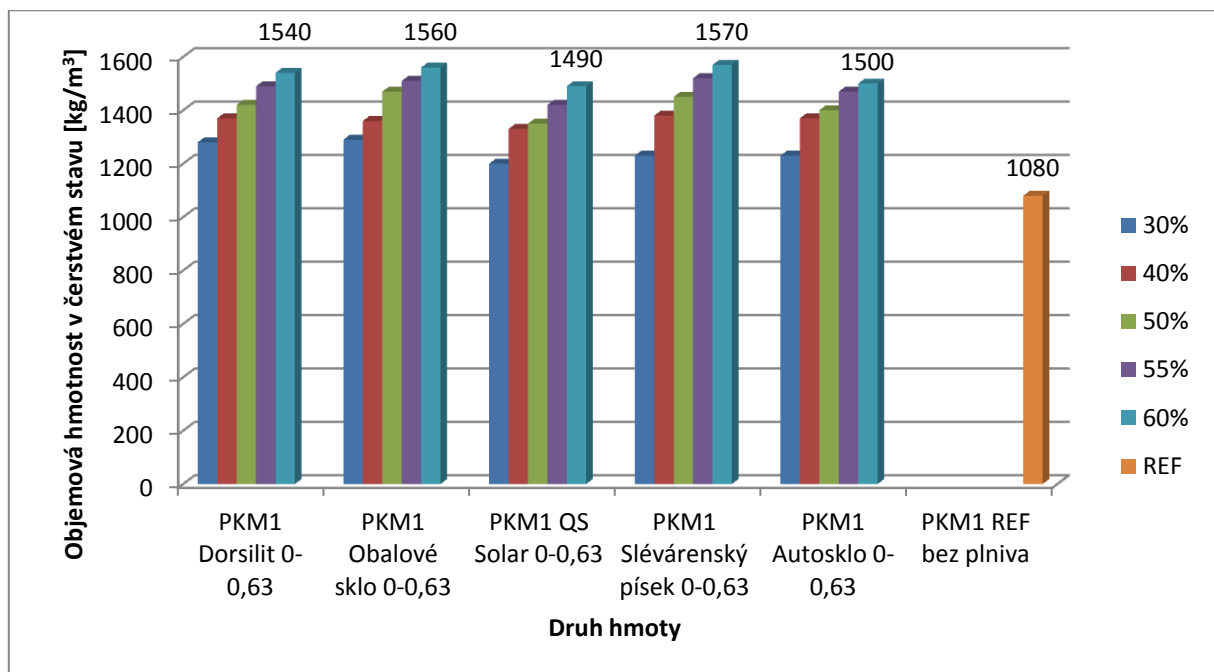
## Vyhodnocení výsledných objemových hmotností a pevností v tahu za ohybu a v tlaku

Tabulka č. 17 – Tabulka výsledných hodnot objemových hmotností a pevností

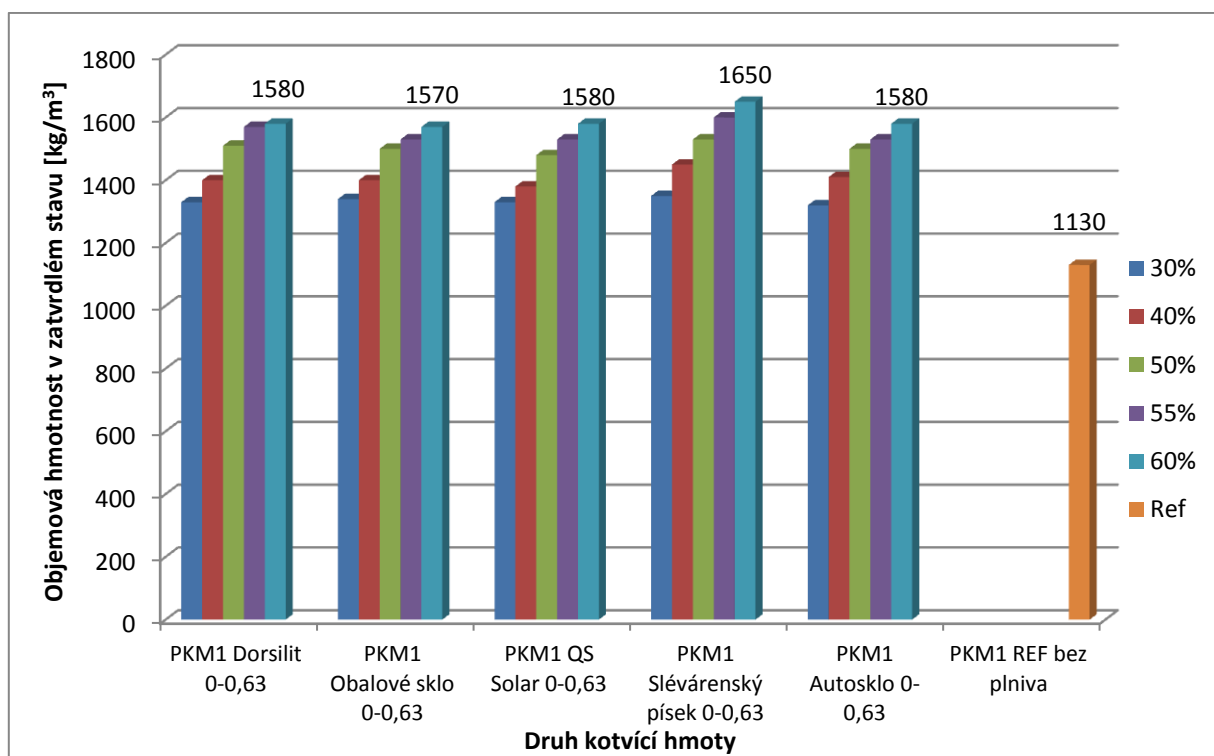
Označení vzorku	Ø Objemová hmotnost v čerstvém stavu [kg·m <sup>-3</sup> ]	Ø Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu [kg·m <sup>-3</sup> ]	Ø Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Ø Pevnost v tlaku [MPa]
PKM1 Dorsilit 0–0,63 30 %	1280	1330	45,2	90,4
PKM1 Dorsilit 0–0,63 40 %	1370	1400	44,8	77,9
PKM1 Dorsilit 0–0,63 50 %	1420	1510	41,1	68,8
PKM1 Dorsilit 0–0,63 55 %	1490	1570	43,9	67,5
PKM1 Dorsilit 0–0,63 60 %	1540	1580	36,6	64,6
PKM1 Obalové sklo 0–0,63 30 %	1290	1340	41,4	78,3
PKM1 Obalové sklo 0–0,63 40 %	1360	1400	44,0	76,3
PKM1 Obalové sklo 0–0,63 50 %	1470	1500	38,3	59,6
PKM1 Obalové sklo 0–0,63 55 %	1510	1530	44,6	60,4
PKM1 Obalové sklo 0–0,63 60 %	1560	1570	42,5	55,8
PKM1 QS Solar 0–0,63 30 %	1200	1330	31,4	52,1
PKM1 QS Solar 0–0,63 40 %	1330	1380	43,8	74,6
PKM1 QS Solar 0–0,63 50 %	1350	1480	39,8	59,2
PKM1 QS Solar 0–0,63 55 %	1420	1530	38,2	54,6
PKM1 QS Solar 0–0,63 60 %	1490	1580	28,9	47,9
PKM1 Slév. písek 0–0,63 30 %	1230	1350	32,4	66,3
PKM1 Slév. písek 0–0,63 40 %	1380	1450	41,2	72,5
PKM1 Slév. písek 0–0,63 50 %	1450	1530	35,0	60,4
PKM1 Slév. písek 0–0,63 55 %	1520	1600	30,6	51,3
PKM1 Slév. písek 0–0,63 60 %	1570	1650	24,9	45,4
PKM1 Autosklo 0–0,63 30 %	1230	1320	23,1	42,1
PKM1 Autosklo 0–0,63 40 %	1370	1410	27,5	45,4
PKM1 Autosklo 0–0,63 50 %	1400	1500	21,6	37,9
PKM1 Autosklo 0–0,63 55 %	1470	1530	30,9	47,9
PKM1 Autosklo 0–0,63 60 %	1500	1580	25,0	42,1
PKM1 REF bez plniva	1078	1130	62,9	92,5

## Grafické vyhodnocení

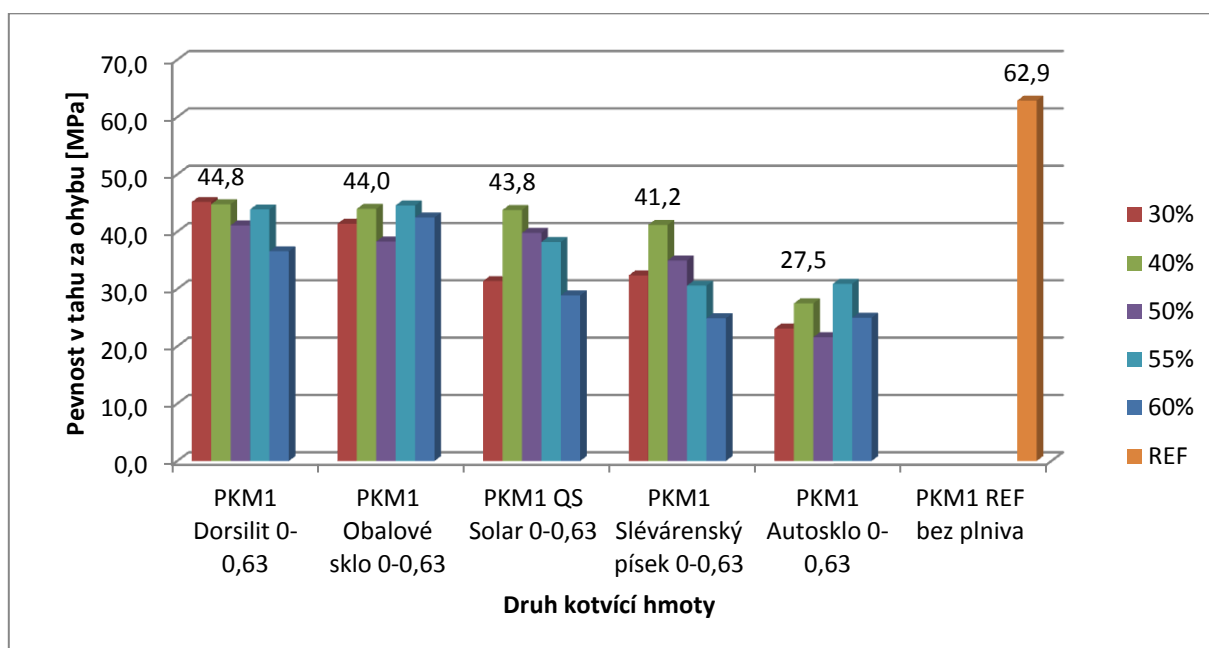
Na následujících grafech jsou zobrazeny závislosti objemové hmotnosti v čerstvém a zatvrdlém stavu, pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku na druhu procentu plnění hmoty PKM1.



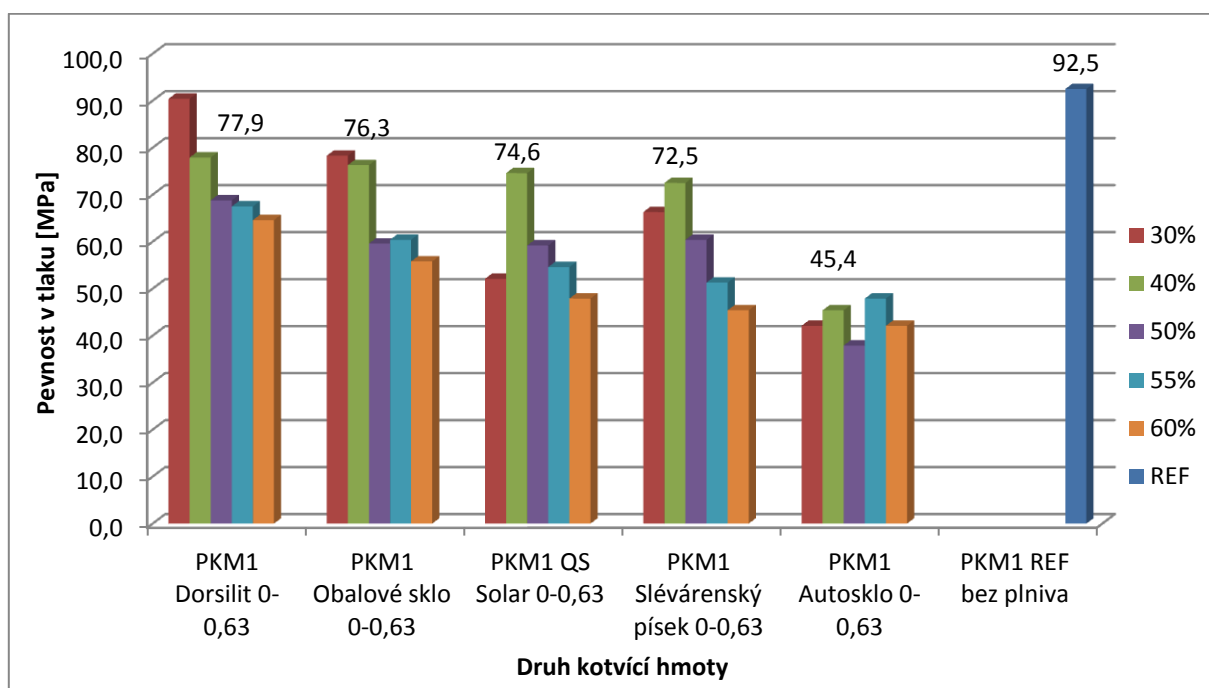
Obr. č. 43 Graf zobrazující měnící se objemové hmotnosti v čerstvém stavu v závislosti na druhu a procentu plnění



Obr. č. 44 Graf zobrazující měnící se objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu v závislosti na druhu a procentu plnění



Obr. č. 45 Graf zobrazující měnící se pevnosti v tahu za ohybu v závislosti na druhu a procentu plnění



Obr. č. 46 Graf zobrazující měnící se pevnosti v tlaku v závislosti na druhu a procentu plnění

U kotvící hmoty PKM1 byly zjišťovány měnící se vlastnosti v závislosti na druhu plniva a procentu plnění. U objemové hmotnosti, jak v čerstvém, tak zatvrdlém stavu, bylo zjištěno, že s rostoucím procentem plnění vzrůstá i objemová hmotnost, přičemž objemová hmotnost v zatvrdlém stavu byla vždy větší než v čerstvém stavu. Tato skutečnost byla pravděpodobně



způsobena polymerizací hmoty, při které dochází k vytvrdnutí hmoty a změně struktury. Největší objemovou hmotnost měla hmota s odpadním slévárenským pískem při 60 % plnění, a to  $1650 \text{ kg/m}^3$  v zatvrdlém stavu a  $1570 \text{ kg/m}^3$  v čerstvém stavu. Nejmenší objemovou hmotnost měla z logiky věci pouze čistá pojivová hmota, a to  $1130 \text{ kg/m}^3$  v zatvrdlém stavu a  $1080 \text{ kg/m}^3$  v čerstvém stavu. Zkoušením pevnosti v tahu za ohybu u vzorků bylo zjištěno, že ideální procento plnění ve většině případů bylo 40 %. S dalším rostoucím plněním již docházelo ke snižování pevností. Největší pevnost v tahu měla neplněná referenční hmota, a to 62,9 MPa a poté hmota s referenčním pískem při 30% plnění, a to 44,8 MPa. Z druhotných surovin měla největší pevnost v tahu za ohybu hmota se 40 % obalového skla, která měla pevnost 44 MPa. Poměrně vysoké pevnosti v tahu za ohybu byly způsobeny vysokou houževnatostí hmoty. U pevnosti v tlaku bylo zjištěno, že s rostoucím procentem plnění dochází také spíše ke snižování pevností. Nejlepší pevnosti v tlaku měly hmoty se 30 % a 40 % plnění, přičemž z druhotných surovin nejlépe vychází hmota se 30 % obalového skla, a to 76,3 MPa. Největší pevnost v tlaku měla referenční neplněná hmota a její hodnota byla 92,5 MPa.

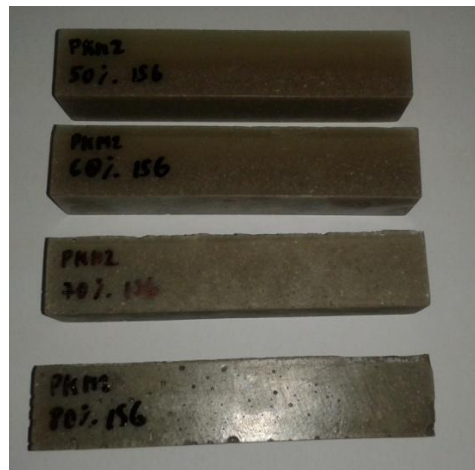
#### 5.4.2.2 Základní zkoušení – PKM2 a PKM3

##### Kotvící hmota PKM2

Použitá kotvící hmota byla oproti předchozí hmotě nízko viskózní, a proto bylo možno zvolit vyšší plnění než u předchozí hmoty PKM1. Byla zde sledována zpracovatelnost spolu s dobou tuhnutí, která nebyla tak krátká jak u předešlé hmoty, ale pohybovala se přibližně kolem jedné hodiny, přičemž počátek tuhnutí nastal přibližně po 30 minutách. Jako plnivo v této hmotě bylo použito obalové sklo (viz. Obr. č. 47), autosklo (viz. Obr. č. 50) a písek Dorsilit (viz. Obr. č. 48) frakce 0-0,63 mm.



Obr. č. 47 PKM2 + 50 % – 80 % obalového skla



Obr. č. 48 PKM2 + 50 % – 80 % Dorsilit



Obr. č. 49 PKM2 Referenční neplněná



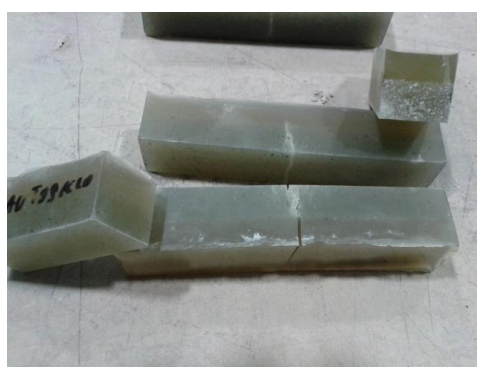
Obr. č. 50 PKM2 + 60 % autosklo

### Kotvicí hmota PKM3

Jedná se o jinou nízko viskózní epoxidovou pojivovou hmotu, která je v podstatě modifikací epoxidového pojiva PKM1 přidáním rozpouštědla pro dosažení nižší viskozity směsi. Vzhledem k nízké viskozitě hmoty a dobré homogenizaci směsi, bylo možné zkoušet maximální procento plnění až 75 %. Nedostatkem této pryskyřice je dlouhá doba tuhnutí, která nenastala ani po 2 hodinách od smíchání obou složek ale až po 12 hodinách. Z tohoto důvodu došlo také k sedimentaci plniva u hmoty s nízkým procentem plnění (viz. Obr. č. 52), což je u chemických kotev nepřijatelné. U této hmoty byla také zjištěna silná přilnavost k silikonu, což mělo za následek obtížné odformování zkušebních těles a v mnohých případech došlo dokonce k takovému poškození formy, že ji nebylo možné dále použít pro výrobu dalších vzorků (viz. Obr. č. 58).



Obr. č. 51 PKM3 + 50 % autosklo



Obr. č. 52 Vzorky po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu



U hmot s vyšším procentem plnění (70 – 75 %) již nedocházelo k tak výrazné sedimentaci plniva, jak je patrné z obr. č. 53 – 54.



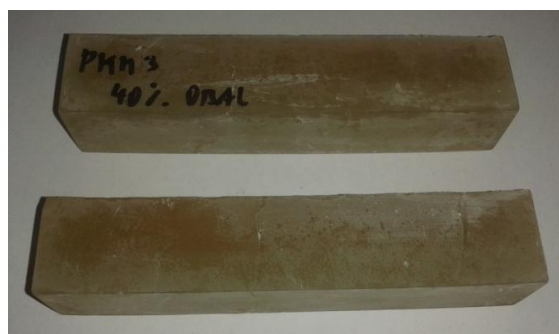
Obr. č. 53 PKM3 + 70 % autosklo



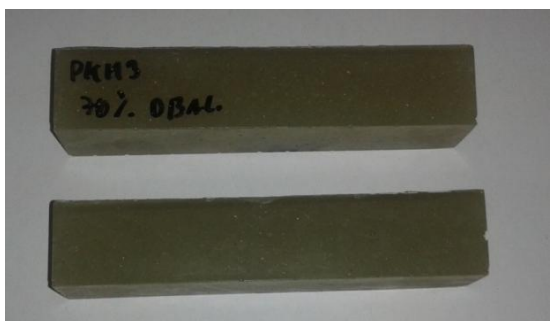
Obr. č. 54 PKM3 + 75 % autosklo



Obr. č. 55 PKM3 + 70 % Dorsilit



Obr. č. 56 PKM3 + 40 % obalové sklo



Obr. č. 57 PKM3 + 70 % obalové sklo



Obr. č. 58 PKM3 – vysoká přilnavost k silikonu



Obr. č. 59 Vzorek před zkouškou pevnosti v tlaku



Obr. č. 60 Vzorek po zkoušce pevnosti v tlaku

Tabulka č. 18 – Výsledné hodnoty objemových hmotností a pevností v tahu za ohybu a v tlaku hmoty PKM2

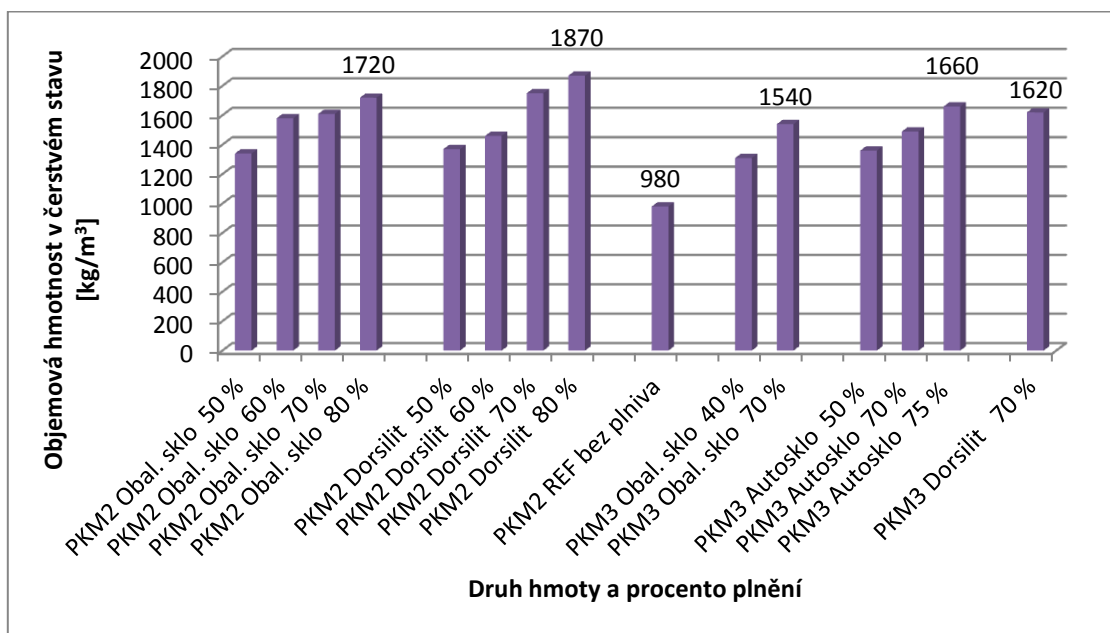
Označení vzorku	Ø Objemová hmotnost v čerstvém stavu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Ø Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Ø Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Ø Pevnost v tlaku [MPa]
PKM2 Obalové sklo 0–0,63 50 %	1340	1500	17,1	63,8
PKM2 Obalové sklo 0–0,63 60 %	1580	1590	23,3	78,3
PKM2 Obalové sklo 0–0,63 70 %	1610	1710	25,8	70,4
PKM2 Obalové sklo 0–0,63 80 %	1720	1760	25,4	62,5
PKM2 Dorsilit 0–0,63 50 %	1370	1530	18,5	75,6
PKM2 Dorsilit 0–0,63 60 %	1460	1660	21,5	75,6
PKM2 Dorsilit 0–0,63 70 %	1750	1760	21,6	85,8
PKM2 Dorsilit 0–0,63 80 %	1870	1930	30,1	68,3
PKM2 REF bez plniva	980	1050	29,1	62,1

Tabulka č. 19 – Výsledné hodnoty objemových hmotností a pevností v tahu za ohybu a v tlaku hmoty PKM3

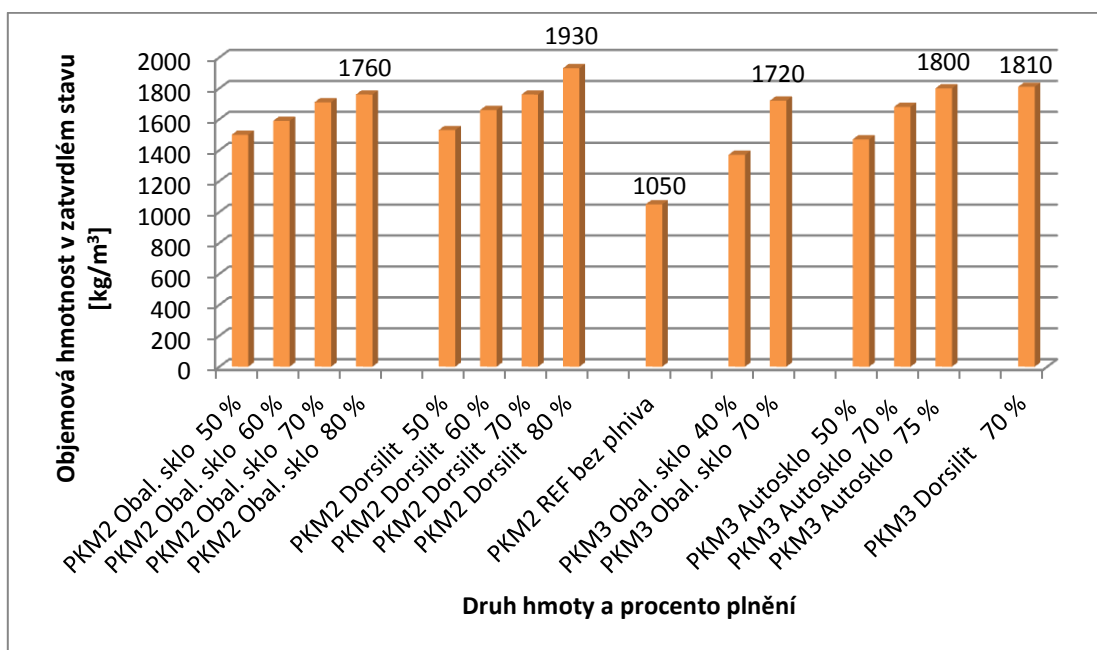
Označení vzorku	Ø Objemová hmotnost v čerstvém stavu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Ø Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Ø Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Ø Pevnost v tlaku [MPa]
PKM3 Obalové sklo 0–0,63 40 %	1310	1370	15,1	20
PKM3 Obalové sklo 0–0,63 70 %	1540	1720	22,6	28,3
PKM3 Autosklo 0–0,63 50 %	1360	1470	19,0	30,8
PKM3 Autosklo 0–0,63 70 %	1490	1680	26,5	35,8
PKM3 Autosklo 0–0,63 75 %	1660	1800	27,4	37,5
PKM3 Dorsilit 0–0,63 mm 70 %	1620	1810	34,7	48,3

## Grafické vyhodnocení

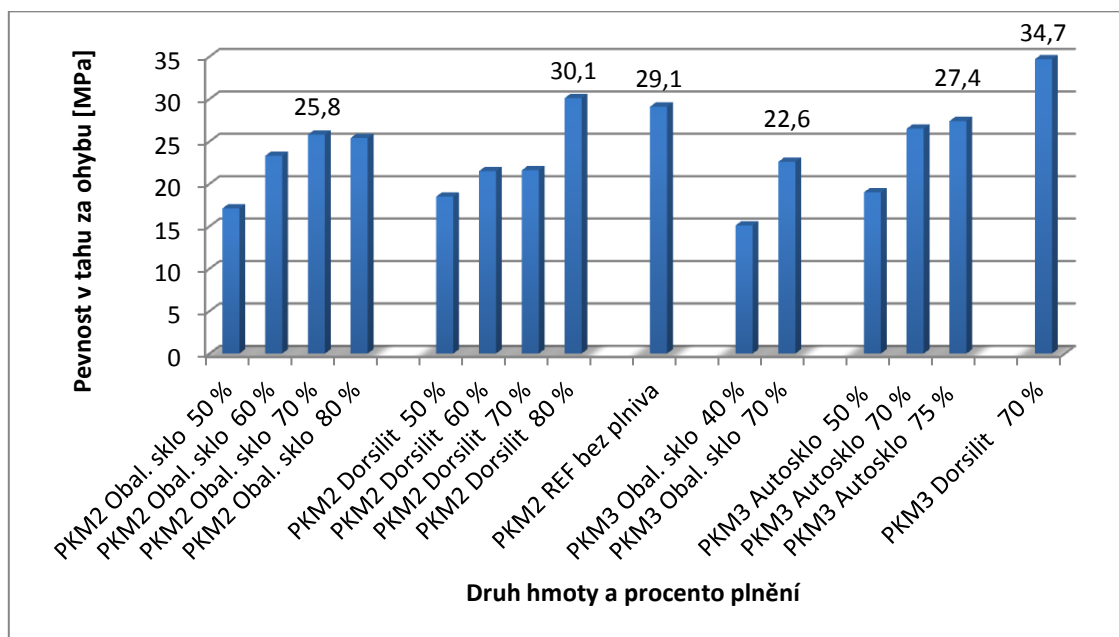
Na následujících grafech jsou zobrazeny závislosti objemové hmotnosti v čerstvém a zatvrdlém stavu, pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku na druhu hmoty, různém procentu plnění a různém druhu plniva.



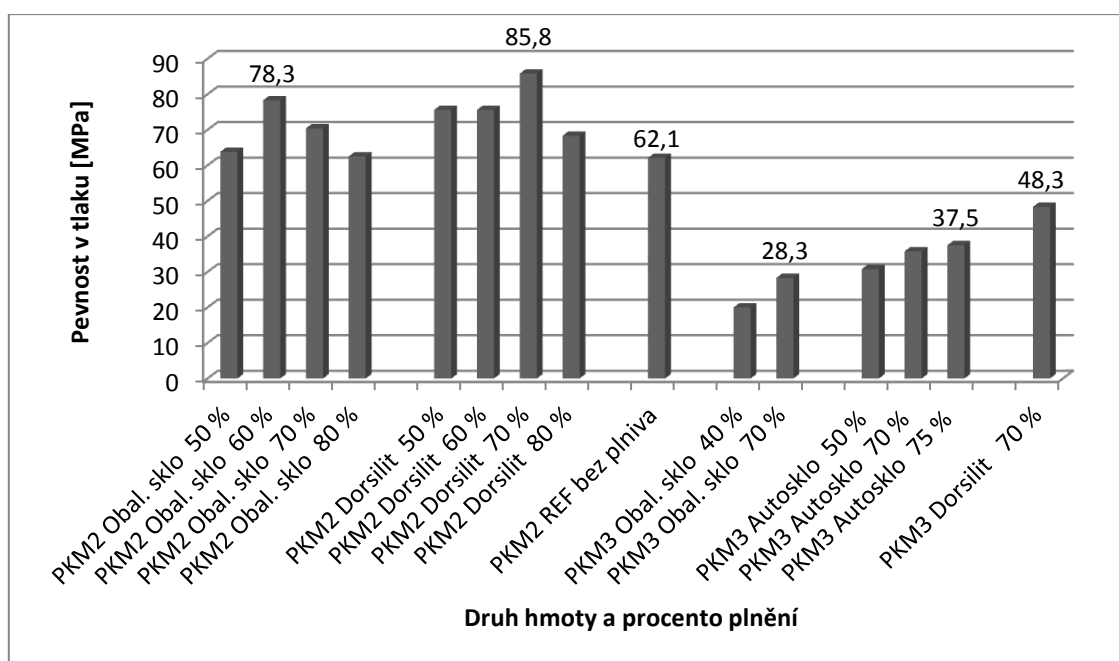
Obr. č. 61 Graf závislosti objemové hmotnosti v čerstvém stavu na druhu hmoty a různém procentu plnění a druhu plniva



Obr. č. 62 Graf závislosti objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu na druhu hmoty a různém procentu plnění a druhu plniva



Obr. č. 63 Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na druhu hmoty a různém procentu plnění a druhu plniva



Obr. č. 64 Graf závislosti pevnosti v tlaku na druhu hmoty a různém procentu plnění a druhu plniva

### Zhodnocení výsledků základního zkoušení

Při zkoušení vzorků hmot PKM2 a PKM3 bylo zjištěno, že tyto hmoty jsou tvrdší a nejsou tak houževnaté jako předchozí hmota PKM1. Objemové hmotnosti jednotlivých hmot jak v čerstvém tak zatvrdlém stavu stoupají s rostoucím procentem plnění a hmoty v zatvrdlém stavu měly vždy větší objemovou hmotnost, než v čerstvém stavu. To bylo pravděpodobně opět způsobeno polymerizací hmot, při kterých dochází k vytvrzování, a tím ke změně struktury hmot. Největší hodnoty objemových hmotností měly hmoty PKM2 s 80 % plnění, konkrétně hmoty s referenčním pískem Dorsilit, který byl plně vysušen, a to v čerstvém stavu  $1870 \text{ kg/m}^3$  a v zatvrdlém stavu  $1930 \text{ kg/m}^3$ . Při zkouškách pevnosti v tahu za ohybu bylo zjištěno, že s rostoucím procentem plnění dochází ke zvýšení pevností. Tato skutečnost ale tak úplně neplatí u obalového skla, kde docházelo ke zvyšování pevností jen po 70% plnění. Při 80 % plnění již byla pevnost v tahu za ohybu menší. Největší pevnost v tahu za ohybu  $34,7 \text{ MPa}$  měla hmota PKM3 se 70 % písku Dorsilit. Vzhledem k tomu, že tato hmota tuhne velmi pomalu a je velmi houževnatá, tak je pro kotvení nepoužitelná. Důležité jsou hodnoty pevností u hmoty PKM2 s obalovým sklem a ideální procento plnění je 70 %, se kterým hmota dosahuje pevnosti  $25,8 \text{ MPa}$ . Pevnosti v tlaku byly jednoznačně nejvyšší u hmoty PKM2, přičemž nejvyšší pevnost v tlaku  $85,8 \text{ MPa}$  měla hmota PKM2 se 70 % písku Dorsilit. Druhou největší pevnost v tlaku měla hmota PKM2 se 60 % obalového skla, a to  $78,3 \text{ MPa}$ . Vzhledem k vysokým pevnostem, poměrně krátké době tuhnutí a možnosti relativně vysokého procenta plnění se jeví jako velmi vhodná právě hmota PKM2 s obalovým sklem. Maximální možné procento plnění u této hmoty je 70 %, protože při vyšších procentech plnění docházelo k obtížnému smíchání jednotlivých složek, což způsobuje nehomogenitu materiálu a s tím související i zhoršené výsledné vlastnosti kotvící hmoty. Hmota PKM3 z důvodu velmi dlouhé doby tuhnutí, relativně malých pevností a vysoké houževnatosti je nevhodná pro další použití.

### 5.4.2.3 Optimalizace hmot PKM1 na základě základních zkoušek

Pro následující optimalizační výpočet metodou kvantitativního párového srovnání byly vybrány hmoty PKM1 se 30%, 40%, a 50% plněním obalovým sklem, QS solarem, autosklem a slévárenským pískem. Rozhodujícími kritérii (viz. Tab. č. 20) byly pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, množství plnění a dostupnost plniv.

Tabulka č. 20 – Výsledné hodnoty zkoušených hmot u zvolených kritérií

Druh kotvící hmoty		PKM1 Obalové sklo			PKM1 QS solar			PKM1 Sléváren. písek			PKM1 Autosklo		
KRITÉRIA	Opt.	30 %	40 %	50 %	30 %	40 %	50 %	30 %	40 %	50 %	30 %	40 %	50 %
1 Pevnost v tlaku [MPa]	MAX	78,3	76,3	59,6	52,1	74,6	59,2	66,3	72,5	60,4	42,1	45,4	37,9
2 Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	MAX	41,4	44	38,3	31,4	43,8	39,8	32,4	41,2	35	23,1	27,5	21,6
3 Množství plnění [%]	MAX	30	40	50	30	40	50	30	40	50	30	40	50
4 Dostupnost plniv [-]	MIN	1	1	1	3	3	3	5	5	5	2	2	2

Tabulka č. 21 – Výpočet váhy - Sattiho matice

	1	2	3	4	Si	Ri	Fi
1	1	8	5	7	280,00000	2,0225	0,4468
2	1/8	1	6	5	3,75000	1,1797	0,2606
3	1/5	1/6	1	1/6	0,00556	0,5225	0,1154
4	1/7	1/5	6	1	0,17143	0,8022	0,1772
Suma						4,5268	1,0000

$$S_i = \prod_{j=1}^n s_{ij} \quad (10) \quad i, j \dots \text{kritéria, prvky matice } S_{ij}$$

$$R_i = (S_i)^{\frac{1}{n}} \quad (11) \quad R_i \dots \text{mezivýpočet}$$

$$F_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (12) \quad F_i \dots \text{váha kritéria}$$

Tabulka č. 22 – Výpočtová matice

Druh kotvící hmoty			PKM1 Obalové sklo			PKM1 QS solar			PKM1 Slév. písek			PKM1 Autosklo		
Ozn.	Fi	Opt.	30 %	40 %	50 %	30 %	40 %	50 %	30 %	40 %	50 %	30 %	40 %	50 %
1	0,447	MAX	44,68	42,47	24,00	15,70	40,59	23,56	31,41	38,27	24,88	4,64	8,29	0,00
2	0,261	MAX	23,04	26,06	19,43	11,40	25,83	21,17	12,56	22,80	15,59	1,75	6,86	0,00
3	0,115	MAX	0,00	5,77	11,54	0,00	5,77	11,54	0,00	5,77	11,54	0,00	5,77	11,54
4	0,177	MIN	17,72	17,72	17,72	8,86	8,86	8,86	0,00	0,00	0,00	13,29	13,29	13,29
Suma			85,44	92,02	72,69	35,97	81,05	65,13	43,97	66,84	52,01	19,68	34,22	24,83

$$b_{ij} = \text{MAX} \rightarrow b_{ij} = \frac{a_{ij} - \text{MIN}(a_i)}{\text{MAX}(a_i) - \text{MIN}(a_i)} \quad (13)$$

$$b_{ij} = \text{MIN} \rightarrow b_{ij} = \frac{\text{MAX}(a_i) - a_{ij}}{\text{MAX}(a_i) - \text{MIN}(a_i)} \quad (14)$$

$$c_{ij} = F_i \cdot b_{ij} \quad (15)$$

$b_{ij}$  ... výpočet hodnoty hledaného minima nebo maxima

$c_{ij}$  ... výsledná hodnota vzniklá vynásobením hodnot  $b_{ij}$  váhou  $F_i$

Z výsledku optimalizačního výpočtu (viz. Tab. č. 22) je vidět, že nejlépe vyšla hmota PKM1 se 40 % obalového skla, která měla největší součet hodnot. Druhou nejlepší hmotou byla hmota PKM1 se 40 % QS solaru. Kotvící hmota se slévárenským pískem byla zamítnuta z důvodu nákladného dovozu této suroviny ze Slovenské republiky. Slévárenský písek by bylo možno použít, ale pouze v případě nalezení vhodného zdroje suroviny se stejnými vlastnostmi v České republice, aby náklady na tuto surovinu nebyly tak vysoké. V již zmíněné tabulce je také vidět, že u všech hmot je ideální procento plnění 40 %. U hmot se 30 % a 50 % jsou výsledné hodnoty menší. Na základě tohoto faktu budou dalšímu pokročilému zkoušení podrobeny především hmoty PKM1 se 40 % obalového skla a QS solaru.

#### 5.4.2.4 Optimalizace hmot PKM2 a PKM3 na základě základních zkoušek

Pro tento níže uvedený optimalizační výpočet metodou kvantitativního párového srovnání byly vybrány hmoty PKM2 a PKM3 se 40 % až 80 % obalového skla a 50 % až 75 % autoskla (viz. Tab. č. 23). Rozhodujícími kritérii byly v tomto případě pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, množství plnění, dostupnost plniv a doba tuhnutí.

Tabulka č. 23 – Výsledné hodnoty zkoušených hmot u zvolených kritérií

Druh kotvící hmoty		PKM2 Obalové sklo				PKM3 Obalové sklo		PKM3 Autosklo		
KRITÉRIA	Opt.	50 %	60 %	70 %	80 %	40 %	70 %	50 %	70 %	75 %
1 Pevnost v tlaku [MPa]	MAX	63,8	78,3	70,4	62,5	20	28,3	30,8	35,8	37,5
2 Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	MAX	17,1	23,3	25,8	25,4	15,1	22,6	19	26,5	27,4
3 Množství plnění [%]	MAX	50	60	70	80	40	70	50	70	75
4 Dostupnost plniv [-]	MIN	1	1	1	1	1	1	2	2	2
5 Doba tuhnutí [-]	MIN	1	1	1	1	6	6	6	6	6

Tabulka č. 24 – Výpočet váhy - Sattiho matice

	1	2	3	4	5	Si	Ri	Fi
1	<b>1</b>	8	6	7	5	336,00000	2,0692	0,4541
2	1/8	<b>1</b>	4	5	3	2,50000	1,1214	0,2461
3	1/6	1/4	<b>1</b>	8	4	0,33333	0,8717	0,1913
4	1/7	1/5	1/8	<b>1</b>	1/7	0,00357	0,4944	0,1085
5	1/5	1/3	1/4	7	<b>1</b>	0,11667	0,7645	0,1678
<b>Suma</b>							4,5566	1,0000

Tabulka č. 25 – Výpočtová matice

Druh kotvící hmoty			PKM2 Obalové sklo				PKM3 Obalové sklo		PKM3 Autosklo		
Ozn.	Fi	Opt.	50 %	60 %	70 %	80 %	40 %	70 %	50 %	70 %	75 %
1	0,454	MAX	34,12	45,41	39,26	33,10	0,00	6,46	8,41	12,31	13,63
2	0,246	MAX	4,00	16,41	21,41	20,61	0,00	15,01	7,80	22,81	24,61
3	0,191	MAX	4,78	9,57	14,35	19,13	0,00	14,35	4,78	14,35	16,74
4	0,109	MIN	10,85	10,85	10,85	10,85	10,85	10,85	0,00	0,00	0,00
5	0,168	MIN	16,78	16,78	16,78	16,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Suma</b>			70,53	99,01	<b>102,64</b>	100,47	10,85	46,67	21,00	49,46	54,98

Výsledkem tohoto optimalizačního výpočtu je zjištění, že z těchto zkoušených hmot (viz. Tab. č. 25) se jako nejlepší jeví hmota PKM2 se 70 % obalového skla. A to především z důvodu nejlepších pevností a krátké doby tuhnutí hmoty a snadnou dostupností plniva. Druhou nejlepší hmotu je kotvící hmota PKM2 se 60 % obalového skla. Hmota PKM3 bude vyloučena z důvodu malých pevností a velmi dlouhé doby tuhnutí.



## Pokročilé doplňkové laboratorní zkoušky

Na základě optimalizace základních laboratorních zkoušek byly vybrány receptury, které vykazovaly nejlepší vlastnosti a tyto receptury byly dále testovány pokročilými doplňkovými laboratorními zkouškami, které jsou podrobně uvedeny níže.

### 5.4.2.5 Stanovení konzistence – Fordův výtokový pohárek

Tato zkouška se prováděla pro určení konzistence vyvíjené kotvící hmoty. Pro stanovení konzistence byl použit Fordův výtokový pohárek (viz. Obr. č. 65) s průměrem výtokové trysky 12 mm. Z důvodu vysoké rychlosti tuhnutí hmoty PKM1 a její vysoké viskozity, se zkouška prováděla s hmotou bez použití tvrdidla. Nejprve byla stanovena konzistence pouze složky A – jak je vidět na obr. č. 65, a poté byla do výtokového pohárku nalita směs složky A se 40 % obalového skla, což je vidět na obr. č. 66. Dále byla zkouška prováděna také na hmotě PKM2 se 70 % obalového skla a se 70 % referenčního písku Dorsilit. Vzhledem k velmi vysoké viskozitě složky A s plnivem bylo nutno použít i nízko viskózní složku B za účelem snížení viskozity hmoty.

Tabulka č. 26 – Časy výtoků hmot v závislosti na druhu hmoty a druhu a množství plniva

Druh hmoty	Čas [min]
PKM1 – pouze složka A	4:50
PKM1 – složka A + 40 % obalové sklo	40:00
PKM2 – pouze složka A	1:50
PKM2 70 % písek Dorsilit	9:30
PKM2 70 % obalové sklo	nelze stanovit



Obr. č. 65 Složka A



Obr. č. 66 Složka A + plnivo



Obr. č. 67 PKM2 + 70 % obalové sklo



Obr. č. 68 PKM2 + 70 % Dorsilit



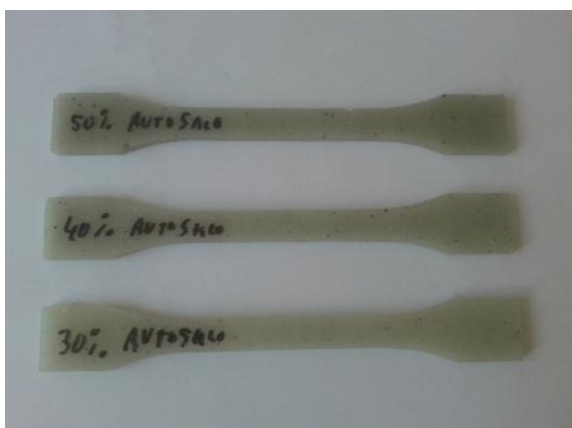
Obr. č. 69 PKM2 se 70 % obalového skla

Z důvodu vysoké viskozity jednotlivých hmot bylo nutno použít výtokový pohárek o průměru 12 mm, aby hmota byla schopná vytéci. Vzhledem k tomu, že v normě takový průměr výtokové trysky není uveden, tak zkouška byla provedena pouze pro orientační stanovení konzistence. U hmoty PKM2 se 70 % obalového skla nebylo možné zkoušku provést až do konce, protože po dvaceti minutách hmota ještě nebyla vytečená a začala pomalu tuhnout.

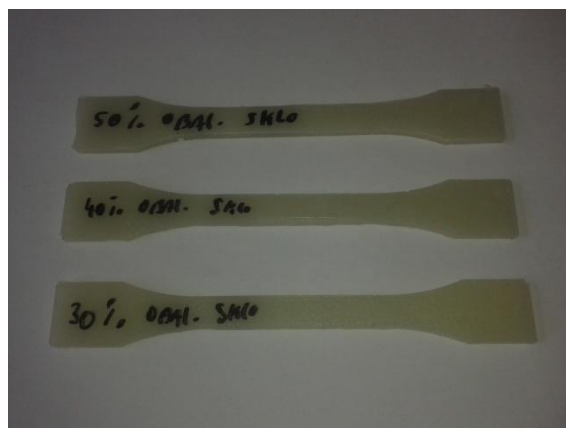
#### 5.4.2.6 Stanovení tahových vlastností hmot PKM1 a PKM2

##### Stanovení tahových vlastností hmoty PKM1

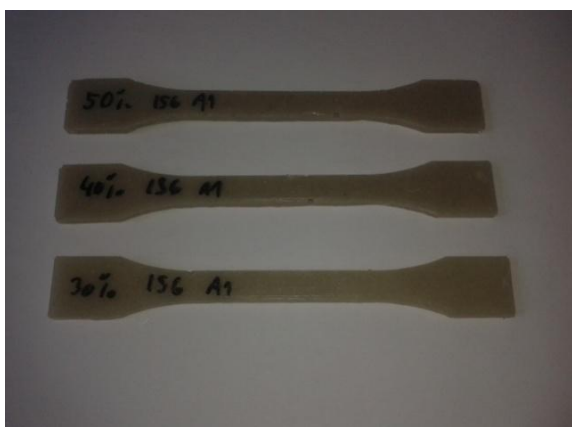
Pro výrobu zkušebních těles byly vybrány 3 druhy odpadního skla – autosklo (viz. Obr. č. 70), obalové sklo (viz. Obr. č. 71), QS solar (viz. Obr. č. 73) a písek Dorsilit (viz. Obr. č. 72). U každého druhu skla byly zvoleny procenta plnění 30 %, 40 % a 50 % hmotnostně a z každé záměsi byly vytvořeny 3 zkušební tělesa – vzorky ve tvaru oboustranných lopatek (viz. Obr. č. 70). Tyto tělesa poté byly podrobeny zkoušce a z naměřených hodnot byly spočítány pevnosti v tahu při přetržení, největší pevnosti v tahu, poměrné prodloužení při přetržení a poměrné prodloužení při největší pevnosti.



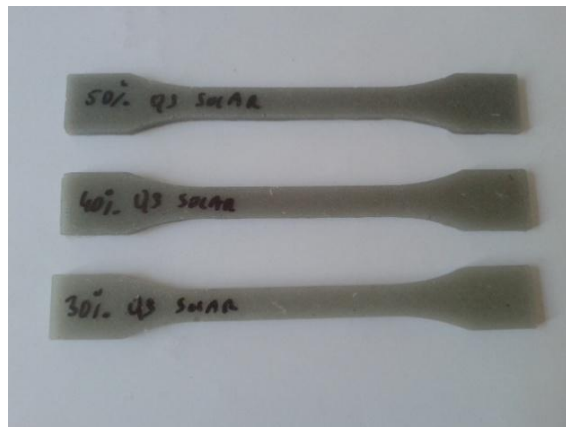
Obr. č. 70 Oboustranné lopatky – autosklo



Obr. č. 71 Oboustranné lopatky – obalové sklo



Obr. č. 72 Oboustranné lopatky – písek Dorsilit



Obr. č. 73 Oboustranné lopatky – QS solar

### Průběh zkoušky stanovení tahových vlastností



Obr. č. 74 Počátek zkoušky



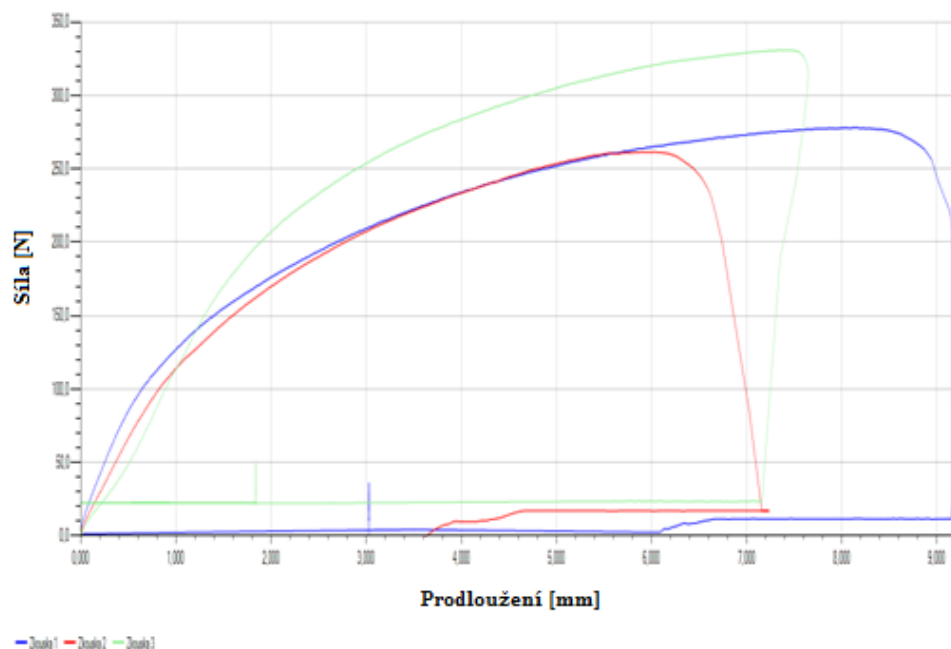
Obr. č. 75 Průběh zkoušky



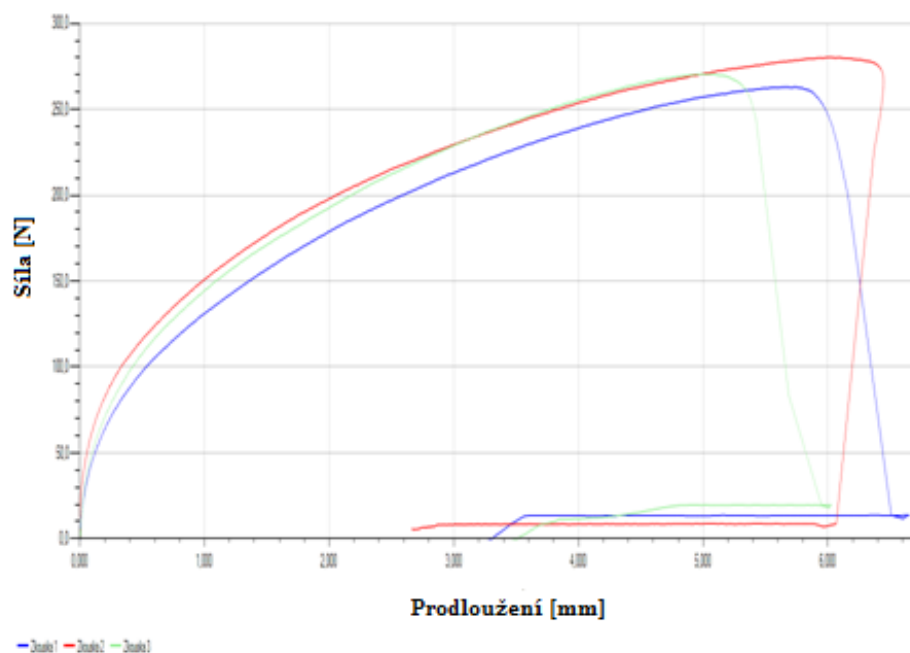
Obr. č. 76 Konec zkoušky

### Grafické znázornění průběhu zkoušky stanovení tahových vlastností

Na následujících pracovních diagramech (viz. Obr. č. 77 a 78) je zobrazen průběh sil v závislosti na prodloužení při zatěžování zkušebních těles tahem.



Obr. č. 77 Pracovní diagram zkušebních těles PKM1 30 % QS solar



Obr. č. 78 Pracovní diagram zkušebních těles PKM1 50 % Dorsilit

### Vyhodnocení zkoušky

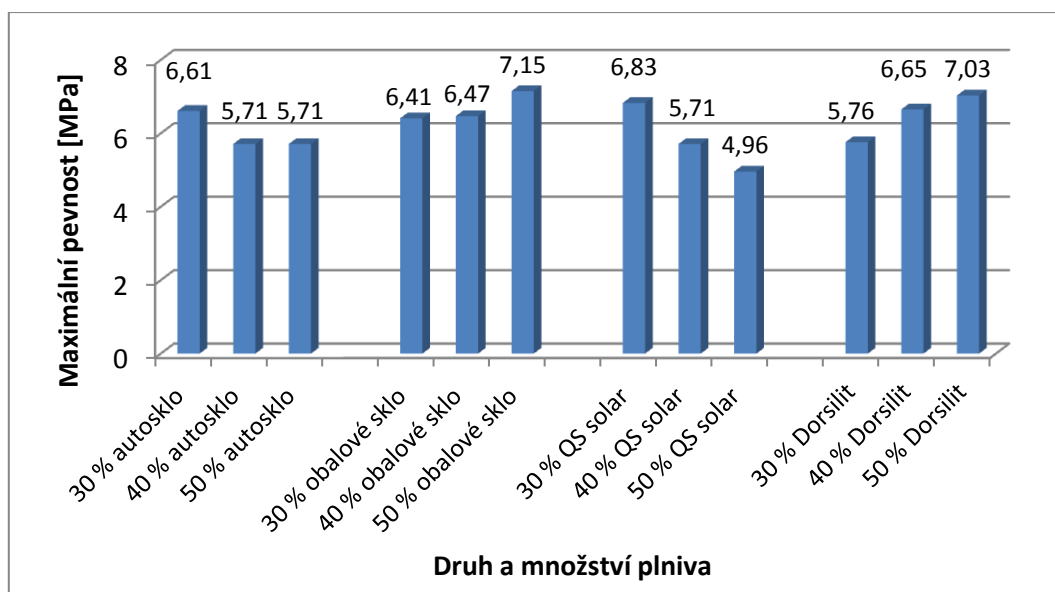
Vyhodnocení výsledných tahových vlastností zkoušených hmot je uvedeno v tabulce č. 27.

Tabulka č. 27 – Výsledné tahové vlastnosti zkoušených hmot

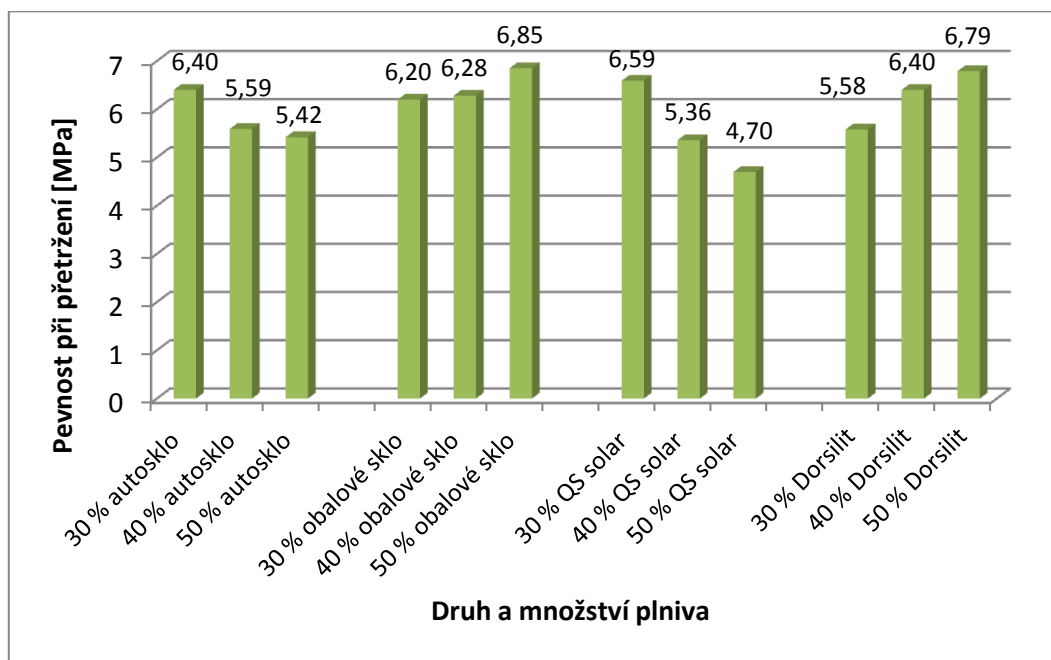
Druh a množství plniva ve hmotě PKM1	Průměrná nejvyšší pevnost v tahu [MPa]	Průměrná pevnost v tahu při přetržení [MPa]	Průměrné poměrné prodloužení při nejvyšší pevnosti [%]	Průměrné poměrné prodloužení při přetržení [%]
30 % autosklo	6,61	6,40	9,291	9,857
40 % autosklo	5,71	5,59	14,503	16,775
50 % autosklo	5,71	5,42	8,343	10,275
30 % obalové sklo	6,41	6,20	16,775	16,961
40 % obalové sklo	6,47	6,28	13,853	14,767
50 % obalové sklo	7,15	6,85	8,474	10,081
30 % QS solar	6,83	6,59	14,363	15,372
40 % QS solar	5,71	5,36	13,849	15,737
50 % QS solar	4,96	4,70	10,003	11,242
30 % Dorsilit	5,76	5,58	18,965	19,429
40 % Dorsilit	6,65	6,40	18,230	18,539
50 % Dorsilit	7,03	6,79	11,075	11,895

### Grafické vyhodnocení tahových zkoušek

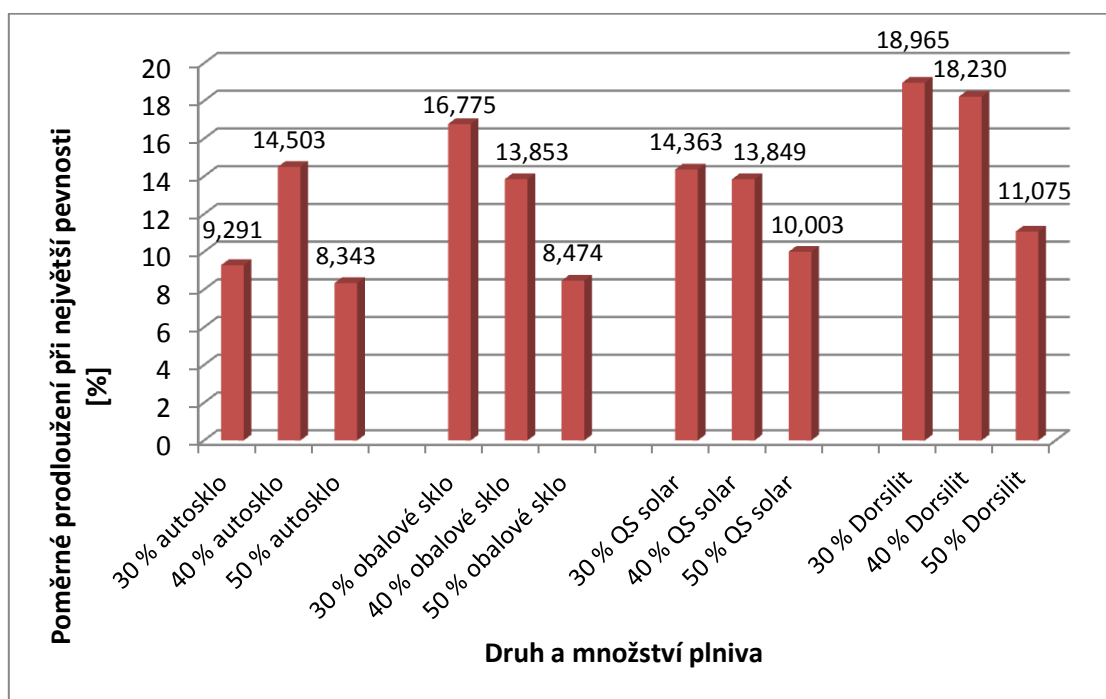
Na níže uvedených sloupcových grafech (obr. č. 79 – 82) jsou uvedeny maximální pevnosti v tahu, pevnosti při přetržení, poměrné prodloužení při největší pevnosti a poměrné prodloužení při přetržení.



Obr. č. 79 Graf závislosti největší pevnosti v tahu na druhu a množství plniva

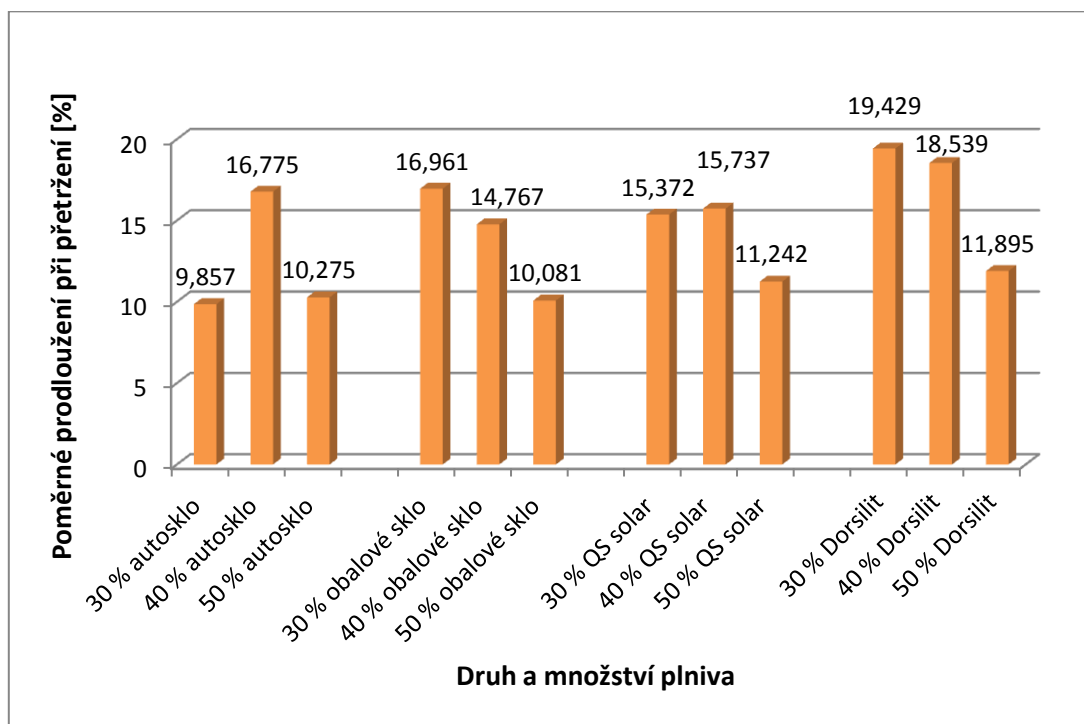


Obr. č. 80 Graf závislosti pevnosti v tahu při přetržení na druhu a množství plniva



Obr. č. 81 Graf závislosti poměrného prodloužení při největší pevnosti na druhu a množství plniva





Obr. č. 82 Graf závislosti poměrného prodloužení při přetržení na druhu a množství plniva

### Zhodnocení tahových vlastností hmoty PKM1

Při stanovování tahových vlastností hmoty PKM1 byly zjišťovány měnící se vlastnosti v závislosti na druhu a procentu plnění. U některých druhů plniv docházelo s rostoucím procentem plnění k nárůstu pevností a u některých naopak ke snižování pevností. Nejvyšší pevnosti v tahu 7,15 MPa dosáhla hmota PKM1 s 50 % obalového skla. Při srovnání maximálních pevností a pevností při přetržení je vidět, že pevnosti při přetržení jsou jen o něco málo menší oproti maximálním. Srovnáním poměrného prodloužení při přetržení a při největší pevnosti je na obr. č. 81 a 82 vidět, že poměrné prodloužení při přetržení je větší než prodloužení při maximální pevnosti. Největší poměrné prodloužení při přetržení bylo u hmoty PKM1 se 30 % písku Dorsilit, a to 19,43 % a poté u hmoty PKM1 se 30 % obalového skla, jehož hodnota činila 16,96 %. Takto vysoká poměrná prodloužení byla pravděpodobně způsobena vysokou houževnatostí zkoušené kotvící hmoty.

### Stanovení tahových vlastností hmoty PKM2

Pro stanovení tahových vlastností u této hmoty bylo jako plnivo zvoleno obalové sklo (viz. Obr. č. 83) a písek Dorsilit (viz. Obr. č. 84), přičemž procento plnění bylo zvoleno 60 % a 70 %.



Obr. č. 83 PKM2 + 70 % obalové sklo



Obr. č. 84 PKM2 + 70 % Dorsilit

### Vyhodnocení zkoušek

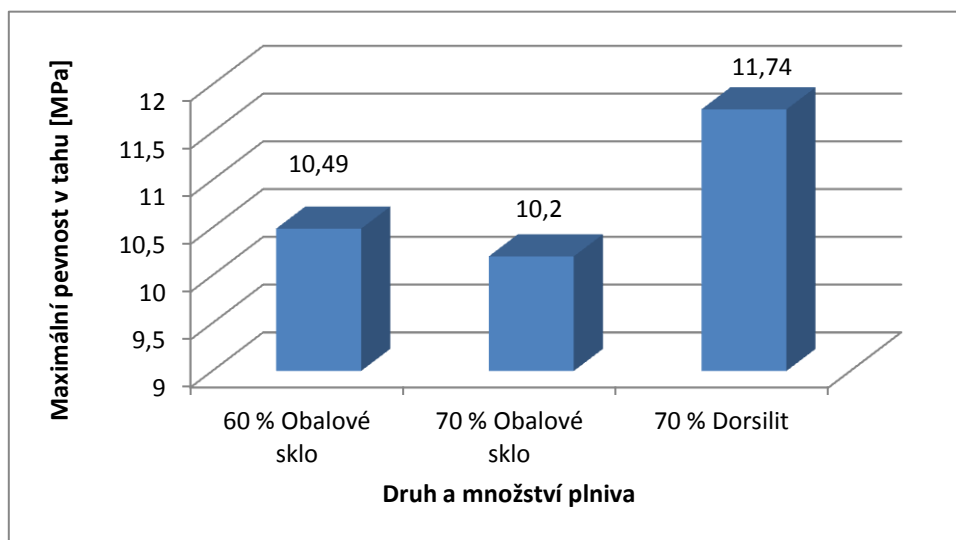
V tabulce č. 28 jsou uvedeny výsledné hodnoty tahových vlastností zkoušených hmot PKM2.

Tabulka č. 28 – Výsledné tahové vlastnosti zkoušených hmot

Druh a množství plniva ve hmotě PKM2	Průměrná maximální pevnost v tahu [MPa]	Průměrná pevnost v tahu při přetržení [MPa]	Průměrné poměrné prodloužení při nejvyšší pevnosti [%]	Průměrné poměrné prodloužení při přetržení [%]
60 % Obalové sklo	10,49	10,35	0,08	0,01
70 % Obalové sklo	10,20	10,09	0,06	0,01
70 % Dorsilit	11,74	11,65	0,08	0,07

### Grafické vyhodnocení tahových zkoušek

Na níže uvedeném grafu (viz. Obr. č. 85) je zobrazena závislost maximální pevnosti v tahu na druhu a množství plniva u hmoty PKM2.



Obr. č. 85 Graf závislosti největší pevnosti v tahu na druhu a množství plniva



### Zhodnocení tahových vlastností hmoty PKM2

Hmota PKM2 vykazuje mnohem lepší tahové vlastnosti než kotvící hmota PKM1. Vzhledem k charakteru hmoty PKM2 je vidět, že poměrné prodloužení u této hmoty je v řádech setin procent oproti hmotě PKM1, kde byly hodnoty poměrného prodloužení 17 % a podobně. Avšak tato hmota má vyšší pevnosti v tahu než předešlá hmota. Největší pevnost v tahu 11,7 MPa měla hmota se 70 % písku Dorsilit. U hmoty s obalovým sklem je pevnost nepatrně menší a jak je vidět na obr. č. 83 tak rozdíl mezi 60 % a 70 % je minimální. Byly vytvořeny i zkušební tělesa z hmoty se 60 % písku Dorsilit, ale nebyly podrobeny zkoušce pevnosti v tahu, protože byly tak křehké, že již při upínání těles do zkušebního lisu došlo k jejich prasknutí.

#### 5.4.2.7 Stanovení rychlosti sedimentace

Cílem této zkoušky je zjištění rychlosti sedimentace plniva v kotvící hmotě na bázi epoxidové pryskyřice. U finálního produktu je důležité, aby nedocházelo k oddělování jednotlivých složek hmoty. Pro zkoušku byly použity skleněné zkumavky o průměru 15 mm, které byly téměř celé naplněny hmotou (viz. Obr. č. 86). Zkouška probíhala na vzorcích hmoty PKM1 s 40 % plnění písku Dorsilit, autoskla, obalového skla, QS solaru a čisté hmoty PKM1 (viz. Obr. č. 87). Pro tuto zkoušku byla použita pouze složka A (epoxidová pryskyřice) bez použití tvrdidla, aby nedošlo k zatvrdnutí hmoty a bylo možno sledovat sedimentaci delší dobu. Takto připravené vzorky byly ponechány po dobu 110 dnů v laboratorních podmínkách. Po uplynutí této doby bylo provedeno zhodnocení.

Tab. č. 15 – Hodnotící systém sedimentace

Hodnoty	Popis hodnocení
1	Vzorek zůstal bez pozorovatelných změn, žádná známka sedimentace
2	Počátky sedimentace: změna barevného odstínu, náznak separace vrstev
3	Lehce pozorovatelné známky sedimentace pouhým okem (hranice vrstev, barva)
4	Jasně pozorovatelná sedimentace: barva, jasné hranice jednotlivých vrstev, možnost určení separovaných vrstev
5	Výrazná sedimentace, separování jednotlivých složek disperzní soustavy

## Sedimentace hmoty PKM1

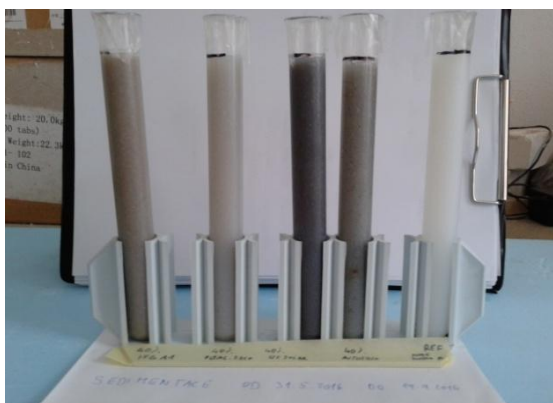
Na následujících obrázcích je možno vidět průběh zkoušky sedimentace hmot PKM1.



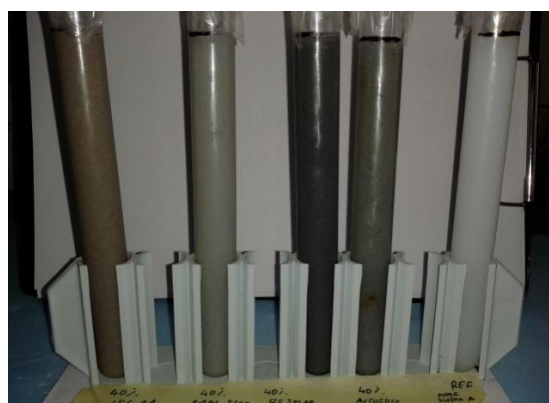
Obr. č. 86 Sedimentace hmot počátku zkoušky



Obr. č. 87 Sedimentace hmot na počátku zkoušky



Obr. č. 88 Sedimentace hmot po 110 dnech



Obr. č. 89 Sedimentace hmot po 110 dnech

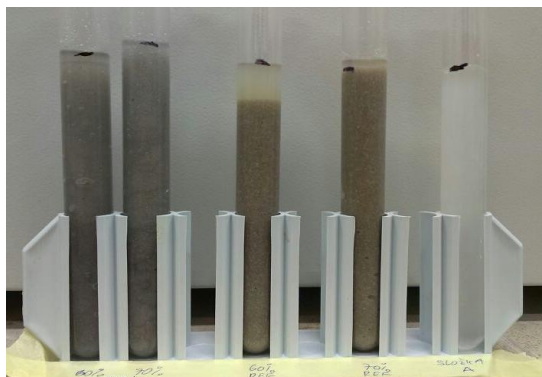
Vzhledem k vysoké viskozitě složky A byly vzorky vystaveny zkoušce sedimentace po dobu 110 dní, aby se zjistilo, zdali i po delší době nedojde k sedimentaci. Po uplynutí této doby, po kterou byly vzorky podrobeny zkoušce sedimentace, bylo zjištěno, že nedošlo k žádné sedimentaci a hmota zůstala homogenní (viz. Obr. č. 89). To bylo způsobeno vysokou viskozitou hmoty, která neumožnila separaci jednotlivých složek.

### Sedimentace hmoty PKM2

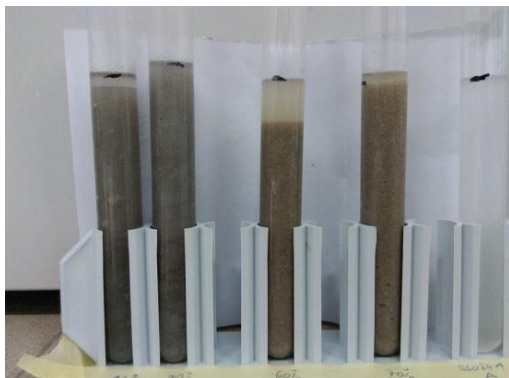
Na následujících obrázcích je možno vidět průběh zkoušky sedimentace hmot PKM2 se 60 % a 70 % obalového skla a písku Dorsilit (viz. Obr. č. 90 – 93).



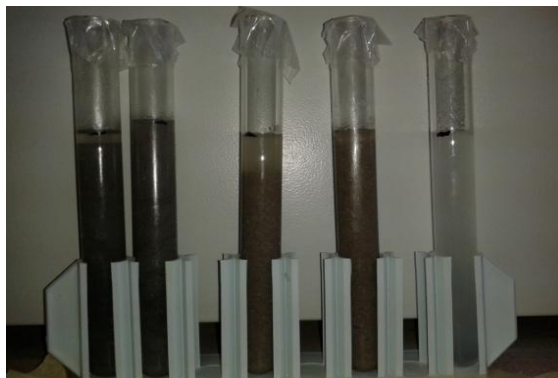
Obr. č. 90 Sedimentace hmot na počátku zkoušky



Obr. č. 91 Sedimentace hmot po 1 dni



Obr. č. 92 Sedimentace hmot pod dvou dnech



Obr. č. 93 Sedimentace hmot po 14 dnech

U této hmoty bylo vidět, že již po krátké době dochází k sedimentaci plniva. Po 14 dnech pozorování bylo zjištěno, že k žádné další sedimentaci plniva již nedochází a zkouška byla ukončena. Po uplynutí této doby se zjistilo, že u hmot se 60 % plniva došlo k částečné sedimentaci, přičemž u písku Dorsilit byla sedimentace větší než u skla. U hmoty se 70 % skla nedošlo téměř k žádné sedimentaci a u hmoty s pískem došlo jen k minimální sedimentaci plniva (viz. Obr. č. 93). Z toho vyplývá, že hmota se 70 % obalového skla se jeví jako nejlepší varianta.

#### 5.4.2.8 Zkrácená zkouška chemické odolnosti

Tato zkouška chemické odolnosti vychází z podnikové zkoušky firmy Lena Chemical s.r.o. [26]. Cílem této zkoušky je zjištění odolnosti vyvíjené hmoty vůči různým a různě koncentrovaným chemikáliím. Chemické agresivní prostředí mohou způsobovat rozpouštění hmoty, potrhání, změknutí nebo změnu barvy. Tato zkouška byla prováděna na hmotě PKM1 s použitím 3 odpadních skel (autosklo, obalové sklo, QS solar) a písku Dorsilit frakce 0–0,63 mm a procentem plnění vždy 40 % a 50 % a dále na hmotě PKM2 se 70 % obalového skla a 70 % písku Dorsilit.

Tabulka č. 14 – Hodnotící systém pro zrychlenou zkoušku chemické odolnosti navržen s ohledem na dosažené výsledky vyvíjených kotvících hmot

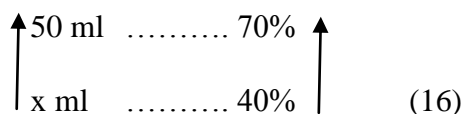
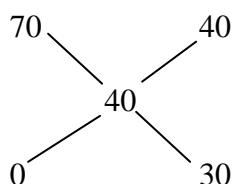
Hodnocení	Popis chování hmot v chemickém prostředí
*****	Hmota nevykazuje žádné změny
*****	Odlepení hmoty od sklíčka
*****	Hmota změkla a odlepila se od sklíčka
****	Barevné změny
***	Odlepení hmoty od sklíčka + barevné změny
**	Hmota nabobtnává + odlepení od sklíčka + barevné změny
*	Úplné porušení hmoty – trhliny (ztráta soudržnosti)

#### Použité agresivní kapalné roztoky

40% NaOH	10% NaCl	Pivo
20% CH <sub>3</sub> COOH	30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Destilovaná voda
30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Benzín	

#### Výpočet potřebných koncentrací agresivních kapalných roztoků křížovým pravidlem

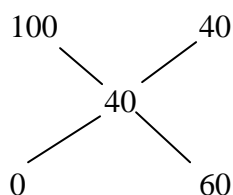
Příprava 50 ml 40% kyseliny sírové (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) z 70% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a vody



(16)

$x = 28,6 \text{ ml } 70\% \text{ H}_2\text{SO}_4 \text{ do } 50 \text{ ml roztoku}$

Příprava 50 ml roztoku 40% hydroxidu sodného (NaOH)



$$x = \frac{40 \cdot 50}{60} = 33,3 \text{ g NaOH do } 50 \text{ ml vody} \quad (17)$$

Příprava vzorků pro zkoušku chemické odolnosti byla prováděna nanesením tenké vrstvy vybraných hmot na laboratorní sklíčka (viz. Obr. č 94 – 97) a jejich následným vložením do připravených kyvet s agresivními kapalnými roztoky (viz. Obr. č. 98).



Obr. č. 94 – 97 Vzorky hmot před uložením do agresivních kapalných roztoků



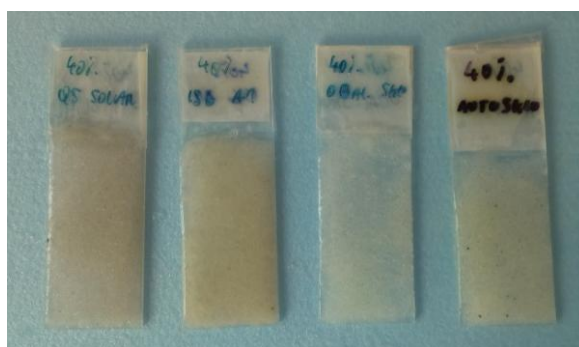
Obr. č. 98 Uložení vzorků do jednotlivých agresivních kapalných roztoků

### Stav vzorků po 7 dnech uložení ve zvolených chemikáliích

Po sedmi dnech byly všechny vzorky vyndány z jednotlivých kyvet a bylo pozorováno, zdali po této době dochází k nějakým vizuálním změnám či nikoli. Na obrázcích číslo 99 – 106 jsou vidět vzorky hmoty PKM1 s 40 % autoskla, obalového skla, QS solaru a písku Dorsilit po vytažení z uvedené agresivní kapaliny po 7 dnech.



Obr. č. 99 Vzorky po vytažení z 40% NaOH



Obr. č. 100 Vzorky po vytažení z 40% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>





Obr. č. 101 Vzorky po vytažení z 10% NaCl



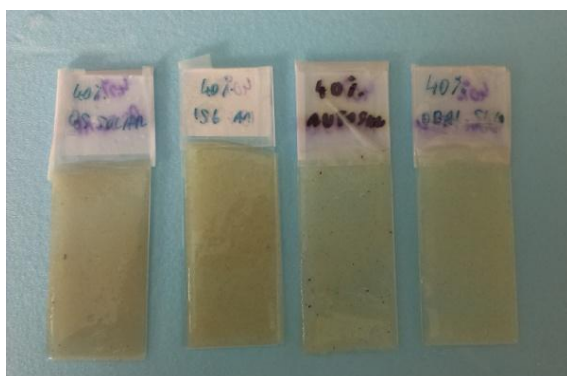
Obr. č. 102 Vzorky po vytažení z 20%  $\text{CH}_3\text{COOH}$



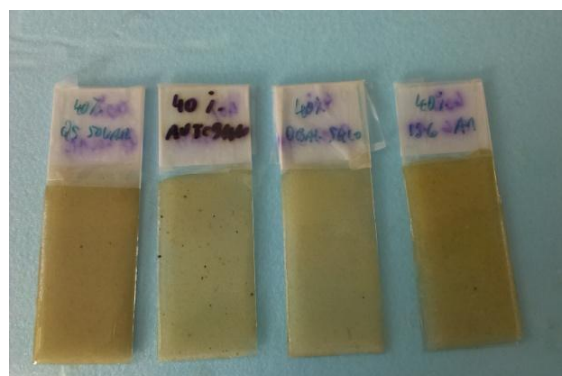
Obr. č. 103 Vzorky po vytažení z 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$



Obr. č. 104 Vzorky po vytažení z benzínu



Obr. č. 105 Vzorky po vytažení z destilované vody

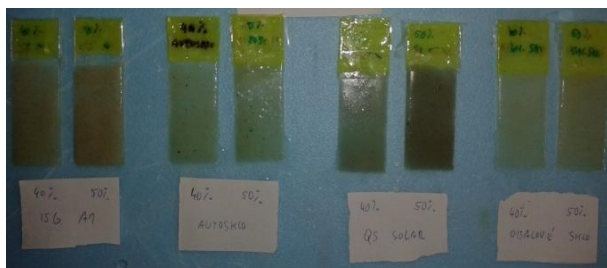


Obr. č. 106 Vzorky po vytažení z piva

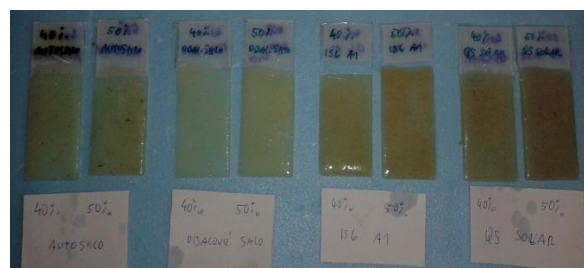
Na výše uvedených obrázcích je vidět, že po sedmi dnech uložení v agresivních kapalinách u většiny vzorků zatím nedošlo k výrazným změnám mimo vzorky uložené v benzínu (viz. Obr. č. 104), které byly potrhány a částečně zežloutly.

### Stav vzorků po 30 dnech uložení ve zvolených chemikáliích

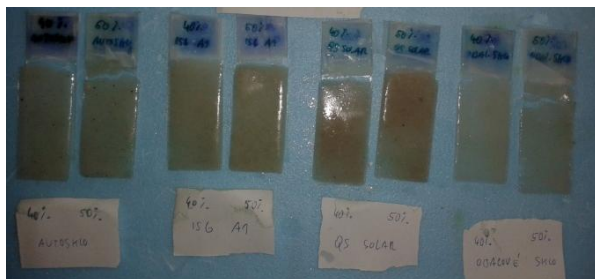
Po 30 dnech byla zkouška ukončena a na vzorcích byly pozorovány vzniklé změny, ke kterým došlo reakcí agresivních kapalin s jednotlivými hmotami. Na obrázcích číslo 107 – 114 je možno vidět vzorky po vytažení z agresivních kapalin po 30 dnech.



Obr. č. 107 Vzorky po vytažení z 40% NaOH



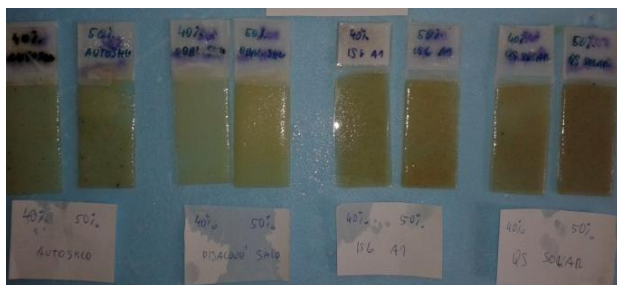
Obr. č. 108 Vzorky po vytažení z 10% NaCl



Obr. č. 109 Vzorky po vytažení z 20% CH<sub>3</sub>COOH



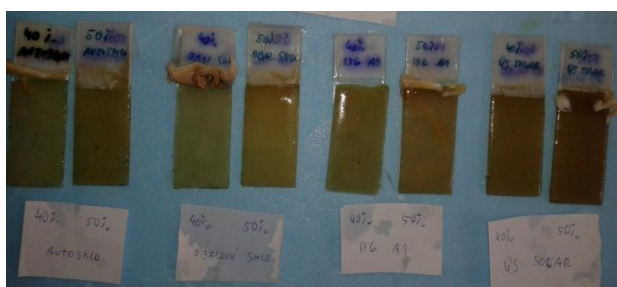
Obr. č. 110 Vzorky po vytažení z 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



Obr. č. 111 Vzorky po vytažení z destilované vody



Obr. č. 112 Vzorky po vytažení z benzínu



Obr. č. 113 Vzorky po vytažení z piva



Obr. č. 114 Vzorky po vytažení z 40% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Na těchto obrázcích je vidět, že po 30 dnech došlo u některých hmot k výraznějším změnám. Největší změny byly viditelné u vzorků uložených v benzínu (viz. Obr. č. 112), v 40% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (viz. Obr. č. 114) a v pivu (viz. Obr. č. 113). Vyhodnocení chemické odolnosti je uvedeno v tabulce č. 29.

### Vyhodnocení chemické odolnosti

V tabulce č. 29 a 30 je provedeno hodnocení chemické odolnosti jednotlivých hmot vůči vybraným chemickým látkám podle hodnotící tabulky č. 14.

Tabulka č. 29 – Tabulka hodnocení chemické odolnosti hmoty PKM1

	Dorsilit 40 %	Dorsilit 50 %	Obalové sklo 40 %	Obalové sklo 50 %	QS solar 40 %	QS solar 50 %	Autosklo 40 %	Autosklo 50 %
40% NaOH	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
20% CH <sub>3</sub> COOH	*****	*****	*****	*	*****	*****	*****	*
30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	*****	*****	*	*****	*****	*****	*****	*****
10% NaCl	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	***	***	***	***	***	***	***	***
Benzín	***	***	*	*	***	***	*	*
Pivo	***	***	***	***	***	***	***	***
Destilovaná voda	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****

Tabulka č. 30 – Tabulka hodnocení chemické odolnosti hmoty PKM2

	Dorsilit 70 %	Obalové sklo 70 %
40% NaOH	*****	*****
20% CH <sub>3</sub> COOH	*****	*****
30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	*****	*****
10% NaCl	*****	*****
30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	***	***
Benzín	***	*
Pivo	***	***
Destilovaná voda	*****	*****

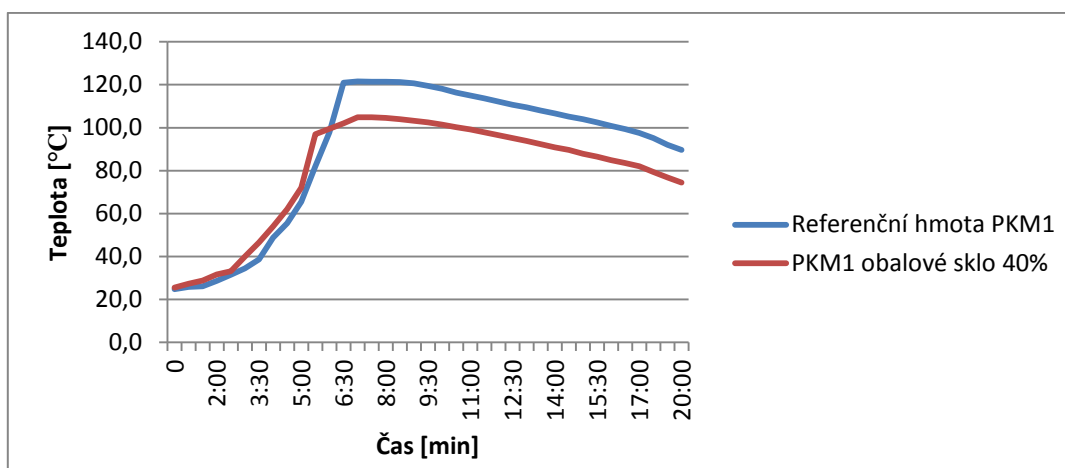
Při zjišťování chemické odolnosti jednotlivých vzorků hmot PKM1 a PKM2 v 8 různých kapalných agresivních prostředích se zjistilo, že ve všech prostředích došlo u hmoty PKM1 k odlepení vzorku hmoty od podkladního sklíčka. Tato skutečnost mohla být způsobena nedostatečným spojením skla a hmoty v důsledku velmi rychlého zatuhnutí hmoty. Naopak u vzorků hmoty PKM2, která zatuhla přibližně po půl hodině, již nedocházelo k odlepování od podložního sklíčka po vytažení z roztoků. Vzorky uložené v prostředí 40% hydroxidu sodného (NaOH) nevykazovaly žádné změny, z čehož vyplývá, že vyvíjená hmota by měla být odolná vůči silnějším zásadám. V prostředí 20% kyseliny octové (CH<sub>3</sub>COOH) došlo u dvou vzorků s autosklem a obalovým sklem k roztržení hmoty. Ostatní vzorky nevykazovaly žádné změny. Vzhledem k tomuto faktu mohlo být natržení hmot způsobeno dřívějším nanesením slabší



vrstvy hmoty na sklíčko. Na vzorcích uložených v benzínu byly viditelné barevné změny. Benzín způsobil zesvětlení vzorků a potrhání hmot. Z toho plyne, že vůči některým organickým látkám a rozpouštědlům nebudou tyto hmoty odolné. Vzorky hmoty PKM1 uložené v prostředí 10% NaCl byly také pouze odlepené od sklíčka a neprojevovaly žádné viditelné změny. V prostředí 30% technického peroxidu vodíku ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) došlo k potrhání vzorku hmoty PKM1 s obalovým sklem, jinak vzorky také nevykazovaly žádné změny. Tato anomálie mohla být také způsobena dřívějším nanesením slabší vrstvy na podložní sklíčko. Vzorky uložené v pivo se výrazně změnily. Pivo způsobilo výrazné ztmavení vzorků a ještě na kontaktu vzorek – pivo – vzduch došlo ke vzniku pravděpodobně nějaké plísně (viz. Obr. č. 113). Prostředí 30% kyseliny sírové ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) způsobilo výrazné zesvětlení vzorků a také jejich částečné potrhání. O epoxidových pryskyřicích je všeobecně známo, že jsou odolné vůči kyselině sírové. [27] Vzhledem k tomu, že vzorky nebyly nijak zvlášť poškozené, jen částečně potrhane a zesvětlené, tak z toho vyplývá, že vyvíjená hmota bude relativně odolná vůči slabým anorganickým kyselinám. V destilované vodě došlo pouze k odlepení vzorků hmoty PKM1 od sklíčka. Vzorky hmoty PKM2 s 70 % obalového skla a 70 % referenčního písku Dorsilit uložené ve výše uvedených agresivních prostředích se chovaly obdobně jako hmota PKM1, což bylo pravděpodobně způsobeno velice podobným složením obou hmot. Celkově se dá říct, že tyto hmoty jsou odolné vůči zásadám a slabým anorganickým kyselinám.

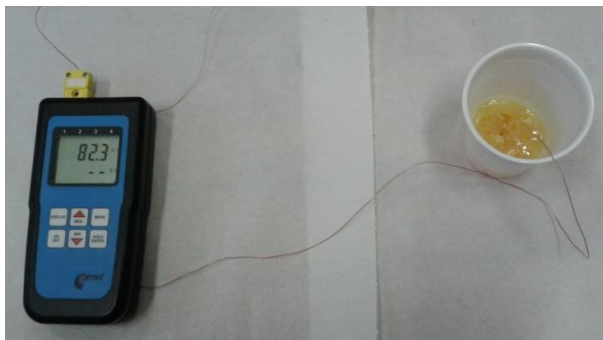
#### 5.4.2.9 Sledování extermické reakce při polymerizaci kotvící hmoty PKM1

Během polymerizace této hmoty dochází k silné extermické reakci a tím k silnému zahřívání hmoty. Nárůst teplot nastává okamžitě po smíchání obou složek kotvící hmoty a nejrychlejší nárůst teplot je přibližně mezi třemi a šesti minutami od smíchání jak je možno vidět na grafu – obrázku č. 115, kdy je polymerizace nejintenzivnější.



Obr. č. 115 Graf průběhu teplot během polymerizace

Při měření v laboratoři byla teplota okolního vzduchu 22,8 °C a měření bylo prováděno pomocí termočláňkového teploměru Comet (viz. Obr. č. 116.)



Obr. č. 116 Termočláňkový teploměr Comet

Při měření bylo dosaženo nejvyšší teploty 121,5 °C u referenční neplněné hmoty. U hmoty s obalovým sklem bylo dosaženo nejvyšší teploty 104,9 °C. Z těchto výsledků vyplývá, že použitím plniva se podařilo snížit maximální teplotu během polymerizace přibližně o 16 °C. Tato zkouška byla prováděna pouze na hmotě PKM1, protože pouze u ní nastávala silná exotermická reakce, a to z důvodu velice rychlého tuhnutí této hmoty. U hmoty PKM2 nedocházelo k tak silné exotermické reakci, protože polymerizace byla pozvolnější a teplota během ní byla tedy podstatně nižší.

#### 5.4.2.10 Stanovení smrštění

Smrštění je u kotevních hmot velice důležitým hodnotícím parametrem. Cílem je dosáhnout co nejmenšího smrštění hmot, aby nedocházelo k uvolňování kotvených prvků v otvorech. Zkouška probíhala na speciálním přístroji Tensograf TGF 02 (viz. Obr. č. 117), který slouží ke stanovení smrštění stavebních materiálů. Zkouška byla prováděna na třech hmotách, přičemž jedna byla referenční neplněná PKM1, druhá hmota PKM1 obsahovala 40 % obalového skla a třetí hmota PKM2 obsahovala 70 % obalového skla.



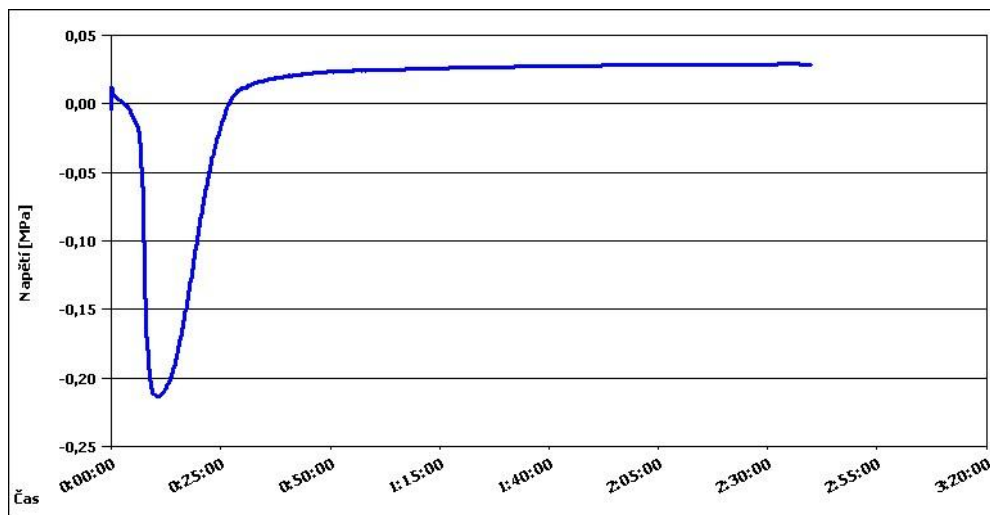
Obr. č. 117 Tensograf TGF 02



Obr. č. 118 Hmota PKM1 + 40 % obal. sklo v Tensografu

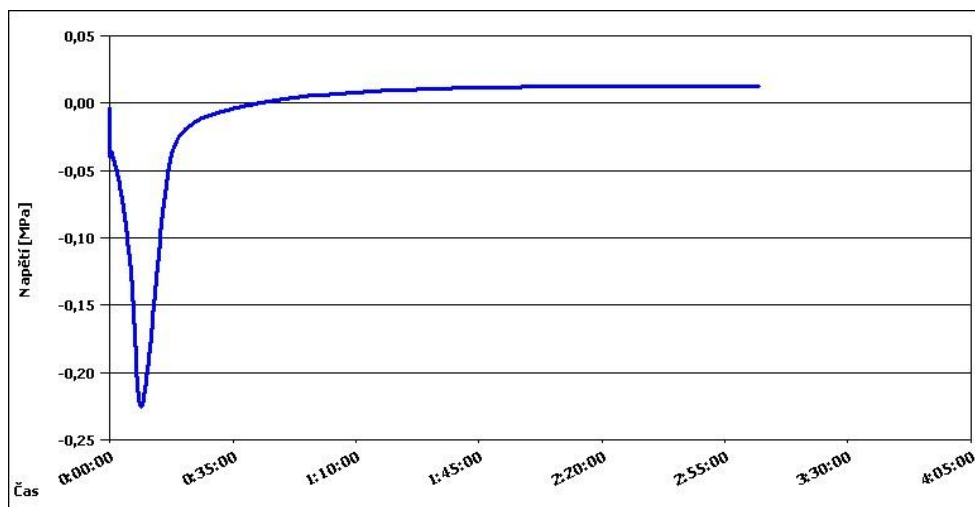
## Vyhodnocení smrštění

Na obrázku č. 119 je možno vidět průběh napětí v referenční hmotě bez plniva, kdy k největším objemovým změnám dochází ve velmi krátké době, přibližně do 10 minut, kdy probíhá polymerizace hmoty. Smrštění po 3 hodinách u této referenční hmoty bylo 0,128 mm na 1 m. Po 4 dnech došlo ke zvětšení hodnoty smrštění na 0,526 mm na 1 m.



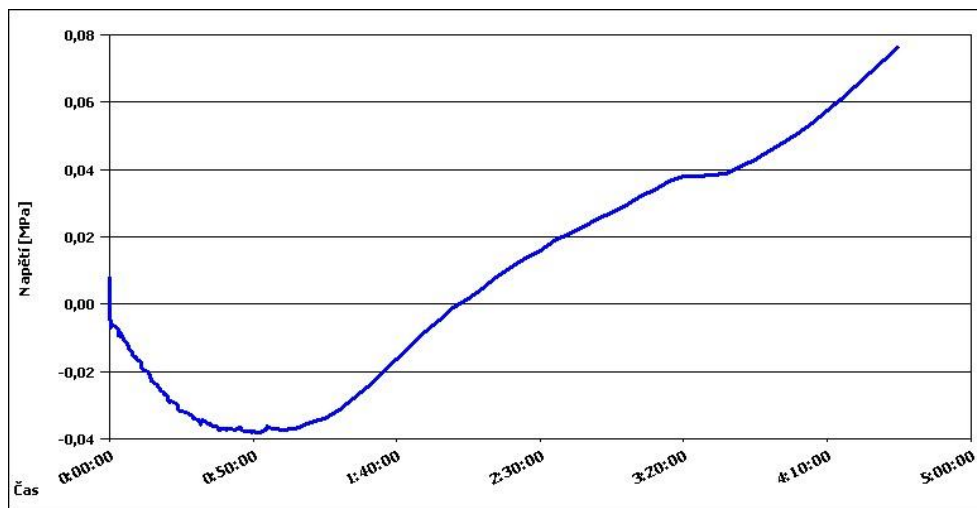
Obr. č. 119 Graf zobrazující průběh napětí ve hmotě PKM1 v závislosti na čase

U kotvící hmoty se 40 % obalového skla je na obrázku č. 120 vidět, že změna napětí je o něco málo větší než u neplněné hmoty, ale čas kdy dochází k objemovým změnám, je přibližně stejný. Použitím 40 % plniva ale došlo ke snížení hodnoty smrštění po 3 hodinách na 0,06 mm na 1 m, což je o polovinu menší smrštění než v předchozím případě. Po 1 dni došlo ale ke zvětšení hodnoty smrštění na 0,129 mm na 1 m.



Obr. č. 120 Graf zobrazující průběh napětí ve hmotě PKM1 + 40 % obalové sklo v závislosti na čase

U kotvící hmoty PKM2 se 70 % obalového skla (viz. Obr. č. 121) je vidět, že průběh napětí má poněkud jiný charakter než u předchozích hmot. To bylo především způsobeno delší dobou tuhnutí této hmoty a tím i mírnější exotermickou reakcí při polymerizaci hmoty. Největšího napětí bylo dosaženo přibližně v čase 50 minut a jeho hodnota je také výrazně menší než u předchozích hmot. Smrštění bylo po 4,5 hodinách přibližně 0,006 mm na 1 m, což je ze všech zkoušených hmot nejmenší hodnota. Po 8 dnech došlo k nárůstu smrštění na konečnou hodnotu smrštění přibližně 0,6 mm na 1 m, což je relativně minimální hodnota.

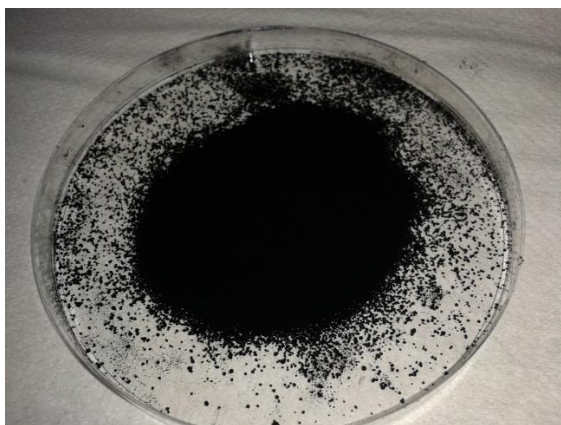


Obr. č. 121 Graf zobrazující průběh napětí ve hmotě PKM2 + 70 % obalové sklo v závislosti na čase

#### 5.4.2.11 Použití uhlíkových nanotrubiček

Uhlíkové nanotrubičky (viz. Obr. č. 122) se používají pro zvýšení ohybových a tahových pevností a snížení modulu pružnosti výsledné hmoty. [19]

Vzhledem k vysoké viskozitě hmoty PKM1, nebylo možné dokonale rozmíchat uhlíkové nanotrubičky do celého objemu hmoty a nanotrubičky vytvořily shluky (viz. Obr. č. 125).



Obr. č. 122 Uhlíkové nanotrubičky



Obr. č. 123 Uhlíkové nanotrubičky před zamícháním





Obr. č. 124 Uhlíkové nanotrubičky po zamíchání



Obr. č. 125 Hmota PKM1 + 40 % obal. + nanotrub.

Tabulka č. 31 - Vyhodnocení výsledných vlastností

Označení vzorku	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Modul pružnosti v tahu za ohybu [MPa]
PKM1 + nanotrubičky	53,2	17,4	230
PKM1 + 40 % obalové sklo + nanotrubičky	41,3	17,4	303
PKM3 + 70 % Dorsilit + nanotrubičky	38,2	20	960

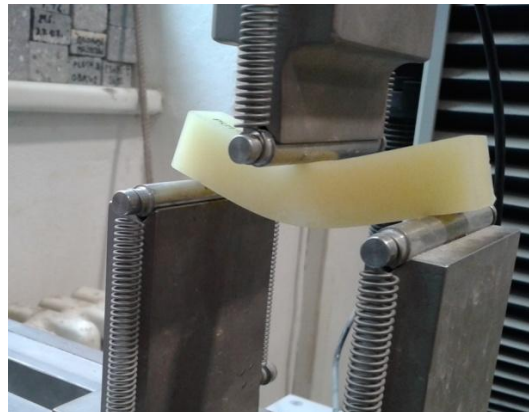
Vzhledem k vysoké houževnatosti používané hmoty a problematického smíchání, je použití uhlíkových nanotrubiček, které způsobují ještě zvětšení houževnatosti hmoty v našem případě naprosto nevhodné. A v neposlední řadě je další nevýhodou i jejich vysoká cena.

#### 5.4.2.12 Zkouška stanovení modulu pružnosti v ohybu

Tato zkouška byla prováděna celkem na třech trámečcích vyrobených ze tří různých směsí. Byly použity dva druhy odpadního skla (obalové a QS solar) a jedna hmota byla referenční bez plniva. Trámečky byly zatěžovány tříbodovým ohybem (viz. Obr. č. 126) a průběhy zatěžování byly zaznamenávány do pracovních diagramů, ze kterých byly spočítány moduly pružnosti v ohybu (viz. Obr. č. 128).



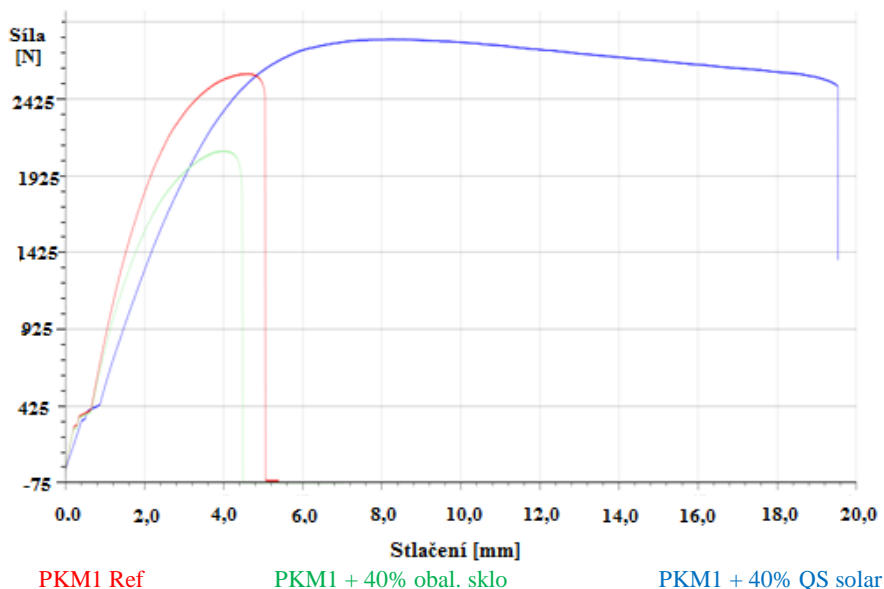
Obr. č. 126 Vzorek po zk. zatěžování tříbod. ohybem



Obr. č. 127 Vzorek PKM1 Ref při zkoušce zatěžování

### Grafické zobrazení průběhu sil jednotlivých hmot v závislosti na stlačení

Na následujícím pracovním diagramu (viz. Obr. č. 128) je zobrazen průběh působících sil v závislosti na stlačení u hmot PKM1 Referenční, PKM1 + 40 % obalové sklo a PKM1 + 40 % QS solar.



Obr. č. 128 Pracovní diagram zobrazující závislost působící síly na stlačení

### Výpočet modulu pružnosti v ohybu – PKM1

$$\epsilon_{F1} = \frac{6 \cdot s_1 \cdot h_1}{L^2} = \frac{6 \cdot 0,3 \cdot 20,32}{80^2} = 0,005715 \quad (18)$$

$$\epsilon_{F2} = \epsilon_{F1} + 0,002 = 0,005715 + 0,002 = 0,007715 \quad (19)$$

$$S_2 = \frac{\epsilon_{F2} \cdot L^2}{6 \cdot h} = \frac{0,007715 \cdot 80^2}{6 \cdot 20,32} = 0,405 \text{ mm} \quad (20)$$

$$\sigma_{F1} = \frac{1,5 \cdot F_1 \cdot L_1}{b \cdot h^2} = \frac{1,5 \cdot 175 \cdot 80}{19,81 \cdot 20,32^2} = 2,57 \text{ MPa} \quad (21)$$

$$\sigma_{F2} = \frac{1,5 \cdot F_2 \cdot L_2}{b \cdot h^2} = \frac{1,5 \cdot 285 \cdot 80}{19,81 \cdot 20,32^2} = 4,18 \text{ MPa} \quad (22)$$

$$E_0 = \frac{\sigma_{F2} - \sigma_{F1}}{\epsilon_{F2} - \epsilon_{F1}} = \frac{4,18 - 2,57}{0,002} = 805 \text{ MPa} \quad (23)$$

Vysvětlení symbolů:

$E_0$ ..... krátkodobý modul pružnosti

$\epsilon_F$ ..... deformace ohybem

$\sigma_F$ ..... napětí v ohybu

$S$ ..... stlačení v lineární části

$F$ ..... síla odpovídající stlačení

$L$ ..... vzdálenost rozpěr podpor

$b$ ..... šířka vzorku

$h$ ..... výška vzorku

### Výsledné hodnoty modulu pružnosti v ohybu

V následující tabulce č. 32 jsou uvedeny zjištěné hodnoty modulu pružnosti v ohybu zkoušených hmot PKM1

Tabulka č. 32 – Výsledné hodnoty modulu pružnosti v ohybu

Druh hmoty	Modul pružnosti v ohybu [MPa]
PKM1 REF	805
PKM1 + 40 % obalové sklo	729
PKM1 + 40 % QS solar	732

Na základě této zkoušky došlo ke zjištění, že přidání plniva – odpadního skla do hmoty způsobí snížení modulu pružnosti v ohybu, přičemž hmota s obalovým sklem měla menší modul pružnosti než hmota s QS solarem.

#### 5.4.2.13 Tepelná odolnost

Tepelná odolnost epoxidových pryskyřic závisí do značné míry na druhu použitého tvrdidla a stupni zesílení. Tvrdidla obsahující alifatické řetězce dávají epoxidovým pryskyřicím menší tepelnou odolnost než tvrdidla s aromatickým jádrem. Značný význam na tepelnou odolnost má i struktura pryskyřic [28].

Zkouška tepelné odolnosti byla prováděna metodou DSC (Diferenční skenovací kalorimetrie) – stanovení teploty skelného přechodu. Teplota skelného přechodu je jednou z nejdůležitějších vlastností epoxidových pryskyřic, kdy polymerní hmota přechází z tvrdého stavu na plastický [29]. Pro tuto zkoušku byla vybrána hmota PKM1 + 40 % obalového skla, PKM1 + 40 % QS solaru, PKM1 referenční bez plniva a dále hmota PKM2 + 70 % písku Dorsilit a PKM2 + 70 % obalového skla.

Tabulka č. 33 – Tabulka zjištěných teplot skelného přechodu posuzovaných hmot

Druh hmoty	Teplota skelného přechodu [°C]
PKM1 + 40 % obalové sklo	17,7
PKM1 + 40 % QS solar	15,3
PKM1 Ref bez plniva	16,1
PKM2 + 70 % obalové sklo	104,3
PKM2 + 70 % písek Dorsilit	106,2

Zjišťování teploty skelného přechodu u hmoty PKM1 bylo prováděno za použití chladicího zařízení, protože teplota skelného přechodu u této hmoty byla nižší než pokojová teplota. Výsledná teplota skelného přechodu byla přibližně 16 °C (viz. Tabulka č. 33), což je

nepřijatelné a tato hmota nesplnila požadavek normy ČSN EN 1504-6 na teplotu skelného přechodu, která musí být  $\geq 45$  °C. Při zjišťování teploty skelného přechodu hmoty PKM2 již nebylo nutné použití chladicího zařízení a u této hmoty byla zjištěna teplota skelného přechodu přibližně 104 °C, jak je vidět v tabulce č. 33. Z výsledku je zřejmé, že tato hmota vyhovuje požadavku výše uvedené normy na teplotu skelného přechodu a zároveň, že bude odolná vůči relativně vysokým teplotám.

Tato experimentální část práce byla nejobsáhlejší etapou praktické části. Na navržených recepturách byly prováděny a vyhodnocovány jednotlivé zkoušky podle připravené metodiky zkoušení. Nejprve bylo na všech recepturách provedeno základní laboratorní zkoušení, po kterém následovala optimalizace dosavadních výsledků těchto zkoušek. Na základě těchto výsledků bylo již na vybraných recepturách prováděno pokročilé laboratorní zkoušení, které bylo již rozsáhlejšího charakteru. Na výsledky pokročilého zkoušení navazuje následující závěrečná etapa, která se zabývá optimalizací pokročilých zkoušek, vytrhávací zkouškou a porovnáním vyvinuté hmoty s komerčními hmotami dostupnými na trhu.

## **5.5 ETAPA V – Optimalizace výsledků pokročilého zkoušení s následným provedením poloprovozního ověření a porovnáním vlastností s dosud používanými kotvícími hmotami**

Tato závěrečná etapa práce se zabývá optimalizací hmot na základě pokročilého zkoušení. Výsledkem bude hmota, která bude poloprovozně testována vytrhávací zkouškou. Vlastnosti této nejlepší hmoty poté budou porovnávány s vlastnostmi dosavadních kotvících hmot vyskytujícími se na trhu.

### **5.5.1 Optimalizační výpočet**

Pro tento závěrečný optimalizační výpočet metodou kvantitativního párového srovnání byly vybrány hmoty PKM1 se 30 %, 40 % a 50 % obalového skla, autoskla a QS solaru a dvě hmoty PKM2 se 60 % a 70 % obalového skla. Rozhodujícími kritérii byly v tomto případě maximální pevnost v tahu, poměrné prodloužení při maximální pevnosti, sedimentace a tepelná odolnost.



Tabulka č. 34 – Výsledné hodnoty zkoušených hmot u zvolených kritérií

Druh plniva		PKM1 Obalové sklo			PKM1 Autosklo			PKM1 QS solar			PKM2 Obalové sklo	
Kritéria	OPT.	30 %	40 %	50 %	30 %	40 %	50 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %
1 Maximální pevnost v tahu [MPa]	MAX	6,41	6,47	7,15	6,61	5,71	5,71	6,83	5,71	4,96	10,49	10,20
2 Poměrné prodloužení při max. pevnosti [%]	MIN	16,78	13,85	8,47	9,29	14,50	8,34	14,36	13,85	10,00	0,08	0,06
3 Sedimentace [-]	MIN	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2
4 Tepelná odolnost [-]	MAX	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2

Tabulka č. 35 – Výpočet váhy – Sattiho matice

	1	2	3	4	Si	Ri	Fi
1	1	6	5	3	90,00000	1,7550	0,4038
2	1/6	1	4	3	2,00000	1,0905	0,2509
3	1/5	1/4	1	1/6	0,00833	0,5497	0,1265
4	1/3	1/3	6	1	0,66667	0,9506	0,2187
Suma						4,3458	1,0000

Tabulka č. 36 – Výpočtová matice

Druh plniva			PKM1 Obalové sklo			PKM1 Autosklo			PKM1 QS solar			PKM2 Obal. sklo	
Ozn.	Fi	Opt.	30 %	40 %	50 %	30 %	40 %	50 %	30%	40 %	50 %	60 %	70 %
1	0,404	MAX	10,59	11,03	15,99	12,05	5,48	5,48	13,65	5,48	0,00	40,38	38,26
2	0,251	MIN	0,00	4,40	12,47	11,24	3,42	12,67	3,63	4,40	10,17	25,06	25,09
3	0,127	MIN	12,65	12,65	12,65	12,65	12,65	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	6,33
4	0,219	MAX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,87	21,87
Suma			23,24	28,07	41,11	35,94	21,55	30,79	29,94	22,52	22,82	87,31	91,55

Na základě tohoto optimalizačního výpočtu bylo potvrzeno, že ze všech hmot byla nejlepší právě hmota PKM2 se 70 % obalového skla v důsledku největší dosažené pevnosti v tahu, a zároveň nejnížší hodnotě poměrného prodloužení. Velice podobné vlastnosti měla hmota PKM2 se 60 % obalového skla, ale především vzhledem k sedimentaci, která u této hmoty nastala, se tato hmota dále používat nebude. Ze zkoušených hmot PKM1 vyšla nejlépe hmota PKM1 se 50 % obalového skla z důvodu největší dosažené pevnosti v tahu při uvedeném procentu plnění a druhu skla, a zároveň tato hmota měla i téměř nejmenší hodnotu poměrného prodloužení. Vzhledem k dřívějšímu zjištění optimálního plnění 40 %, se tato hmota s 50 % obalového skla dále nebude používat. Jak je vidět v tabulce č. 36, tak vybraná hmota PKM1 se 40 % obalového skla má nejvyšší hodnotu ze všech ostatních hmot při tomto procentu plnění.

Vzhledem k nejlepším vlastnostem, které hmota PKM2 se 70 % obalového skla vykazovala při základním a pokročilém zkoušení, bude především tato hmota podrobena poloprovoznímu ověření vytrhávací zkouškou. K poloprovoznímu ověření bude použita také hmota PKM1 se 40 % obalového skla, která při ideálním 40% plnění měla ze všech ostatních hmot, při tomto stejném plnění, nejlepší vlastnosti.

### 5.5.2 Zkouška výrobků pro kotvení vytrhávací zkouškou

Tato zkouška se prováděla až na samý závěr. Postupovalo se přesně podle normy ČSN EN 1881 a bylo důležité dosáhnout toho, aby výsledná hodnota posunutí při zatížení 75 kN, byla menší než 0,6 mm, jak stanovuje norma ČSN EN 1504-6. Nejprve bylo potřeba vyrobit betonové bloky podle rozměrů daných normou (viz. Obr. č. 129). Pro výrobu bloků byl použit vysokopevnostní beton třídy C 40/50.



Obr. č. 129 – 130 Příprava betonových bloků pro následné kotvení.

Po 28 dnech, kdy měl beton pevnost v tlaku 52,5 MPa, se dle požadavků normy vyvrtaly otvory do hloubky 150 mm o průměru 20 mm (viz. Obr. č. 131). Poté se otvory důkladně vyčistily stlačeným vzduchem a mechanickým kartáčem. Do těchto otvorů byly kotveny ocelové závitové tyče o průměru 16 mm (viz. Obr. č. 133). Jako kotvící hmoty byly vybrány hmoty, které nejlépe vyšly z optimalizačního výpočtu pokročilého zkoušení. Byla použita především hmota PKM2 se 70 % obalového skla, jejíž doba tuhnutí byla přibližně 30 minut, a dále hmoty PKM1 se 40 % obalového skla a PKM1 se 40 % QS solaru, které zatuhly přibližně za 6 minut. Kotvící hmoty PKM3 se 40 % obalového skla, PKM3 se 70 % obalového skla, jejichž doba tuhnutí byl přibližně 12 hodin, a referenční hmota PKM1 bez plniva byly použity jen pro srovnání.



Obr. č. 131 – 132 Vrtání otvorů



Obr. č. 133 Zakotvení závitových tyčí

Po sedmi dnech se prováděla vytrhávací zkouška zabudovaných kotev. Pro tuto zkoušku bylo potřeba sestavit trhací zařízení, které se skládalo z podstavce, hydraulického válce a hydraulické pumpy od firmy KGF, siloměru, podložky, vyrovnávacího kloubu, vysokopevnostních matic, indukčních snímačů pro zaznamenávání posunutí a elektronického systému zaznamenávajícího zvyšující se sílu a posunutí od firmy HBM (viz. Obr. č. 135). Po sestavení zařízení se pomocí hydraulické pumpy začala zvyšovat tahová síla na zabudovanou kotvu, až došlo k porušení. Výsledkem byla hodnota největší síly a jí odpovídající posunutí. Při provádění vytrhávací zkoušky byla vlhkost betonu měřena kontaktním vlhkoměrem 1,6 %.



Obr. č. 134 Sestavování zařízení



Obr. č. 135 Vytrhávací zařízení



Obr. č. 136 Provádění zkoušky





Obr. č. 137 Kotvy po zkoušce vytržení



Obr. č. 138 Kotva PKM1 bez plniva po vytažení z betonu



Obr. č. 139 PKM3 40 % obal. sklo – povytažení z hmoty



Obr. č. 140 PKM3 70 % obalové sklo



Obr. č. 141 – 142 Utržení ocelové závitové tyče – hmota PKM2 + 70 % obalové sklo

## Výsledné hodnoty

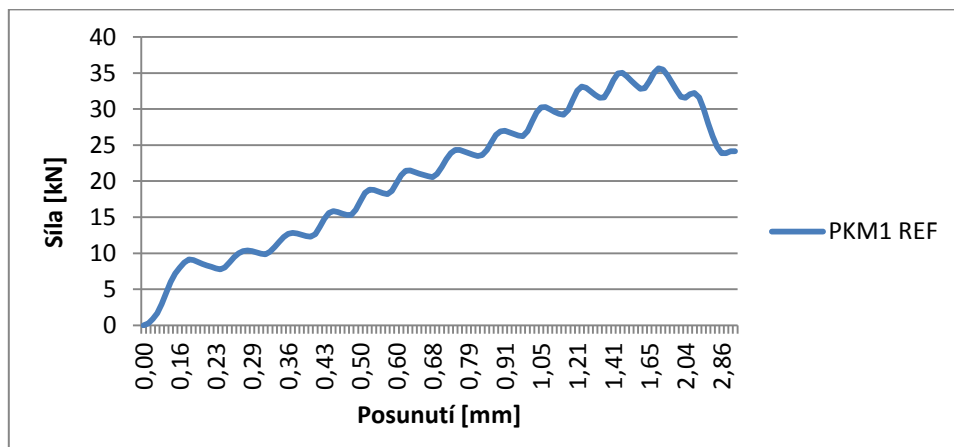
V níže uvedené tabulce jsou uvedeny hodnoty maximálních sil při vytržení a k nim odpovídající hodnoty posunutí.

Tabulka č. 37 – Výsledné hodnoty maximálních sil při vytržení a odpovídající posunutí

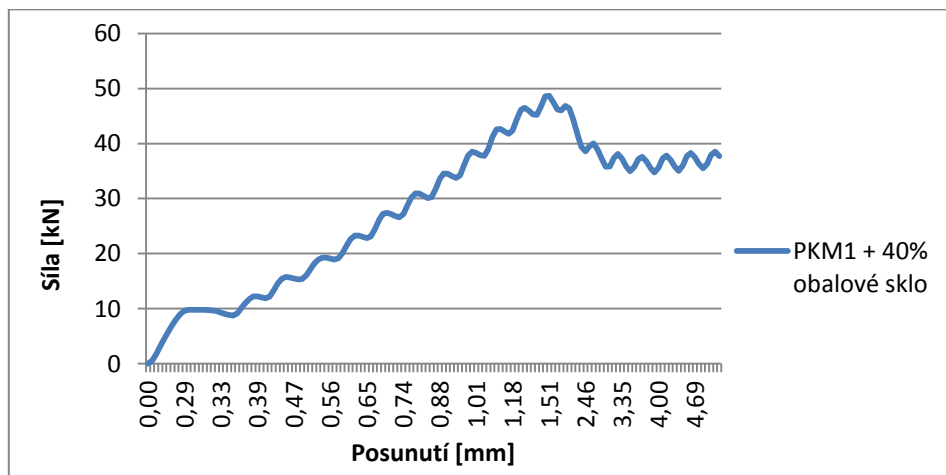
Označení hmoty	Maximální síla [kN]	Posunutí [mm]
PKM1 REF	35,65	1,612
PKM1 40 % Obalové sklo	48,69	0,943
PKM1 40 % QS solar	43,23	1,045
PKM2 70 % Obalové sklo	75,24	0,561
PKM3 40 % Obalové sklo	52,13	8,194
PKM3 70 % Obalové sklo	64,27	2,937

## Grafické vyhodnocení

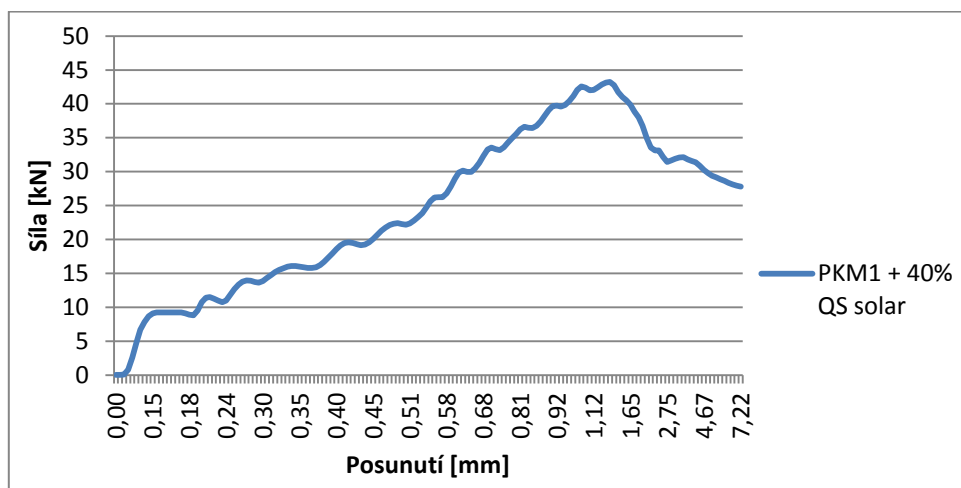
Na těchto grafech je vidět závislost vytrhávající síly a jí odpovídající hodnota posunutí kotvy v otvoru.



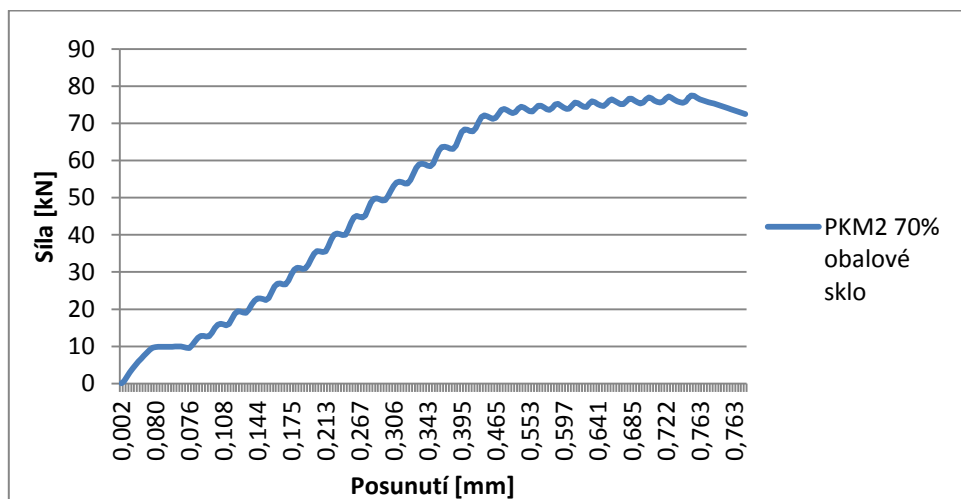
Obr. č. 143 Graf závislosti vytrhávající síly na posunutí u referenční hmoty



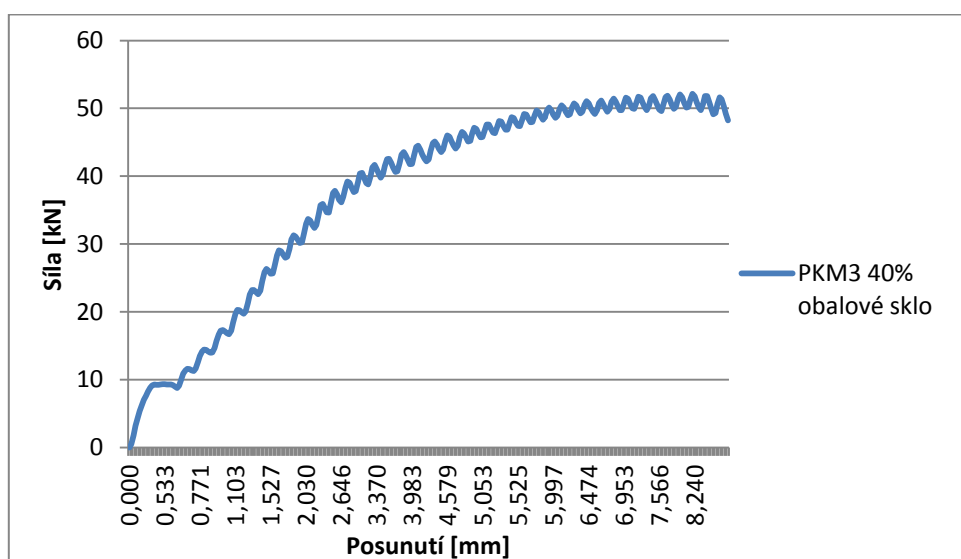
Obr. č. 144 Graf závislosti vytrhávající síly na posunutí hmoty PKM1 se 40 % obalového skla



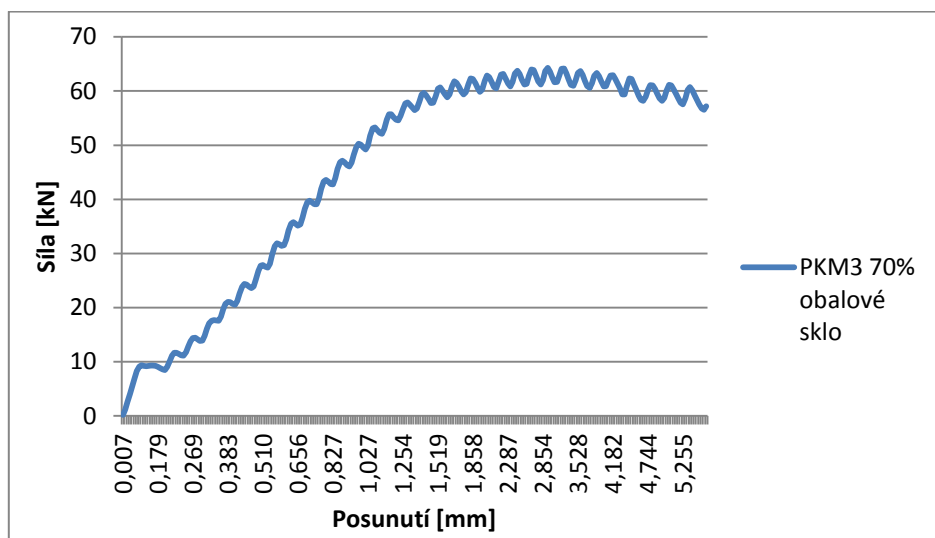
Obr. č. 145 Graf závislosti vytrhávající síly na posunutí hmoty PKM1 se 40 % QS solaru



Obr. č. 146 Graf závislosti vytrhávající síly na posunutí hmoty PKM2 se 70 % obalového skla



Obr. č. 147 Graf závislosti vytrhávající síly na posunutí hmoty PKM3 se 40 % obalového skla



Obr. č 148 Graf závislosti vytrhávací síly na posunutí hmoty PKM3 se 70 % obalového skla

### Zhodnocení výsledků vytrhávací zkoušky

Po provedení vytrhávacích zkoušek jednotlivých kotevních hmot, bylo sledováno, které kotvící hmoty splnily podmínku posunutí  $\leq 0,6$  mm při zatížení 75 kN. Bylo zjištěno, že tuto podmínku splnila pouze hmota PKM2 se 70 % obalového skla. Po dosažení síly 75 kN, byla nadále zvyšována síla, přičemž posunutí se nijak výrazně nezvětšovalo, ale po chvíli došlo k přetržení závitové tyče o průměru 16 mm. Tato hmota má tak výborné pevnosti, že zabudovaná kotva se v betonu neposunula, ale přetrhla se závitová tyč (viz. Obr. 141). To posunutí bylo pravděpodobně způsobeno průtažností ocelové závitové tyče při zatěžování. Ostatní hmoty nedosáhly ani na požadovanou hodnotu 75 kN a ani nesplnily požadavek na hodnotu posunutí. U těchto hmot došlo k poruše soudržnosti na kontaktu lepidlo – beton. Tvar křivky grafu (viz. Obr. č. 143 – 145) zobrazující průběh vytrhávací zkoušky vypovídá o tom, že soudržnost byla vyšší než tření na kontaktu [30]. Pevnosti kotvící hmoty PKM1 se pohybovaly přibližně od 40–50 kN při posunutí přibližně 1 mm. V tabulce č. 14 je vidět, že kotvící hmota PKM1 se 40 % obalového skla má o něco málo větší pevnost než hmota s QS solarem, z čehož plyne, obalové sklo se jeví jako výhodnější plnivo. Velkou výhodou těchto hmot je ale jejich velmi vysoká rychlost tuhnutí, a proto se dá tato kotvící hmota použít pro extra rychlé kotvení lehkých předmětů a prvků. U kotvící hmoty PKM3 byly pevnosti o něco málo větší než u hmoty PKM1 a pohybovaly se někde v rozmezí 50–60 kN, ale posunutí zde bylo podstatně větší, a to v rozmezí 3–8 mm. Větší posunutí nastalo u hmoty se 40 % obalového skla a bylo způsobeno sedimentací plniva na dně otvoru, což způsobilo špatné ukotvení závitové tyče. Hlavní nevýhodou této hmoty je ale její velmi dlouhá doba tuhnutí, a proto je tato hmota nevhodná pro rychlé kotvení.

### 5.5.3 Porovnání vyvinutých kotvicích hmot s dosavadními hmotami vyskytujícími se na trhu

V následující tabulce č. 38 jsou uvedeny porovnávané vlastnosti vyvinutých a komerčních kotvicích hmot. Důležitými parametry jsou především maximální tahová síla a počátek a doba tuhnutí.

Tabulka č. 38 – Srovnání vyvinuté kotevní hmoty s komerčními hmotami [8], [31], [32], [33]

Parametr	PKM1	PKM2	Hilti HIT-RE 500	Mungo MIT600RE	Sika Anchorfix-3 <sup>+</sup>	Fischer FIS-EM 390 S
Průměr výztuže [mm]	16	16	16	16	12	16
Pevnostní třída betonu	C 40/50	C 40/50	C 20/25	C 20/25	C 20/25	C 20/25
Pevnost šroubů	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
Teplota okolí [°C]	20	20	20	20	20	20
Max. tahová síla [kN]	48,69	75,24	64,75	53,6	> 70	37,6
Počátek tuhnutí [min.]	6	30	20	30	30	25
Plně vytvrzen [hod.]	1	2	12	10	25	16
Pevnost v tlaku [MPa]	76,3	70,4	-	-	114	-

Pro srovnání vlastností byly vybrány čtyři komerční kotvicí hmoty na epoxidové bázi, a to Hilti HIT-RE 500, Mungo MIT600RE, Sika Anchorfix-3<sup>+</sup> a Fischer FIS-EM 390 S, přičemž hodnoty uvedené v tabulce č. 38 byly převzaty z příslušných technických listů [8], [31], [32], [33]. Tyto hmoty sloužily pro srovnání vlastností s vyvinutými hmotami PKM1 a PKM2, přičemž důraz byl kladen na hmotu PKM2, protože hmota PKM1 nevyhověla požadavkům stanovených v příslušné normě ČSN EN 1504-6. Tato hmota může být použita pro extra rychlé kotvení lehkých předmětů. Při srovnávání těchto nových kotvicích hmot s komerčními hmotami, byly použity závitové tyče stejné pevnostní třídy 5.8 a zkoušení probíhalo při okolní teplotě 20 °C. Až na jeden případ u Siky Anchorfix-3<sup>+</sup> byly pro srovnání použity tyče průměru 16 mm. Výraznějším rozdílem je pevnost betonu, ve kterém byly kotvicí hmoty zkoušeny. Zkoušky komerčních kotvicích hmot se prováděly vytržením na betonu třídy C 20/25 a v našem případě byl použit vysokopevnostní beton třídy C 40/50 z důvodu následného použití vyvíjené hmoty pro kotvení právě do vysokopevnostních betonů. Porovnávány byly doby počátku tuhnutí a úplného vytvrzení, tahové síly zabudovaných kotev a u některých hmot i pevnost v tlaku. Bylo zjištěno, že počátek doby tuhnutí u nové hmoty PKM2 je přibližně stejný jako u komerčních hmot, ale plně vytvrzena je hmota PKM2 podstatně dříve než ostatní komerční hmoty. Při porovnání největší tahové síly zabudovaných kotev je vidět (viz. Tab. č. 38), že největší tahová síla je právě u vyvinuté hmoty PKM2. Tato skutečnost byla pravděpodobně způsobena tím, že hmota byla aplikována do



vysokopevnostního betonu na rozdíl od komerčních hmot. Dalším vysvětlením může být i to, že tato síla je maximálně možná pro zatěžování ocelové závitové tyče o pevnosti 5.8, protože dalším zvětšováním síly došlo k přetržení závitové tyče (viz. Obr. č. 141). Pro zjištění skutečné hodnoty síly zabudované kotvy by bylo potřeba použít vysokopevnostní závitovou tyč, která je ale výrazně dražší (kus cca 2000 Kč), a proto nebyla použita. Celkově se dá říct, že nová vyvinutá hmota má některé vlastnosti stejné, ale mnohé ještě lepší než v současnosti využívané hmoty a navíc obsahuje velké množství druhotné suroviny.

## 6 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit nový progresivní kotevní materiál na polymerní bázi vynikající poměrem mezi rychlostí aplikace a nárůstem pevností s vysokou chemickou a tepelnou odolností a minimálním smrštěním při využití druhotných surovin. Celý vývoj nového kotevního materiálu byl rozdělen celkem do 5 etap.

První etapa práce byla zaměřena na vstupní suroviny a jejich podrobnou identifikaci. Jako plniva byly použity speciálně upravené druhotné suroviny frakce 0 – 0,63 mm a frakce  $\leq 0,063$  mm a pro srovnání byl použit primární křemičitý písek Dorsilit frakce 0 – 0,63 mm. Použité druhotné suroviny byly vybrány na základě optimalizace z předcházející bakalářské práce [1]. Jako nejvhodnější se jevílo odpadní sklo - (autosklo, obalové sklo, sklo ze solárních panelů typů QS solar a sklo Simax) a odpadní slévárenský písek z důvodu obsahu vysokého množství chemicky odolného  $\text{SiO}_2$  a dalšími vynikajícími fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, přičemž se svými vlastnostmi nejvíce podobají současně využívaným primárním plnivům. Vzhledem k tomu, že jedním z dílčích cílů práce je prozkoumání možnosti využití rozptýlené nanovýztuže, tak právě proto byly použity uhlíkové nanotrubičky. Pojivovou složkou kotvicí hmoty byly epoxidové pryskyřice (s označením PKM1, PKM2 a PKM3), z důvodu jejich výborných fyzikálních, mechanických i chemických vlastností.

V rámci druhé etapy byl proveden návrh receptur, vycházející z vybraných vstupních surovin. Při návrhu receptur bylo snahou dosáhnout co největšího množství plnění z důvodu nahrazení co největšího množství ekonomicky a ekologicky náročných primárních surovin. Vzhledem k různé viskozitě jednotlivých pojivových hmot, byla pro každou hmotu zvolena různá procenta plnění. Pro hmotu PKM1, která byla vysoce viskózní, byla zvolena procenta plnění od 10 % do 60 % a pro hmoty PKM2 a PKM3, které byly naopak nízko viskózní, byly

navrženy procenta plnění od 40 % do 80 %. Důležité bylo najít takové optimální množství plniva, které by zajistilo, aby výsledná kotvící hmota měla vynikající vlastnosti při co největším možném plnění.

Třetí etapa práce se věnovala návrhu metodik zkoušení a experimentálního ověření vyvíjených kotvících hmoty. Schéma metodiky zkoušení bylo navrženo tak, že nejprve se prováděly základní laboratorní zkoušky na jednotlivých navržených recepturách, které byly rozděleny na zkoušky v čerstvém stavu a na zkoušky v zatvrdlém stavu. Poté byla provedena optimalizace výsledků základního zkoušení a na základě těchto výsledků byly prováděny doplňkové pokročilé laboratorní zkoušky již na vybraných recepturách, které blíže specifikovaly vyvíjené hmoty. Vzhledem k budoucímu využití vyvíjené kotvící hmoty, kde bude kladen důraz především na vysoké pevnosti, chemickou odolnost, minimální smrštění a odolnost vůči vysokým teplotám, byly doplňkové pokročilé zkoušky zaměřeny především na zkoušení těchto vlastností. Výsledky pokročilého zkoušení byly opět optimalizovány a na vybraných nejlepších recepturách bylo provedeno poloprovazní ověření vytrhávací zkouškou.

Čtvrtá etapa práce byla nejdůležitější etapou a jednalo se o experimentální prověření navržených receptur dle navržené metodiky zkoušení. Nejprve byly prováděny základní zkoušky na hmotě PKM1 s plnivem frakce  $\leq 0,063\text{mm}$ , protože chemické kotvy jsou většinou neplněné. Vzhledem k vysoké viskozitě hmoty PKM1 bylo obtížné takhle jemné plnivo dobře smísit s pojivem a při provádění zkoušek pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku se zjistilo, že výsledná hmota je vysoce houževnatá, což je u chemických kotev nepřijatelné. Na základě těchto skutečností bylo rozhodnuto, že plnivo frakce  $\leq 0,063\text{mm}$  již nebude používáno, a dále bylo testováno použití hrubšího plniva frakce 0 – 0,63 mm, čemuž byla věnována druhá část této etapy. Tato část se skládala ze základních laboratorních zkoušek, v rámci kterých byla zjišťována vhodnost použití vybraných plniv a pojiv v souvislosti s hledáním optimálního procenta plnění. Z výsledků základních zkoušek vyplynulo, že přibližné optimální procento plnění u hmoty PKM1 bude v rozmezí mezi 30 % – 50 % z důvodu vysoké viskozity hmoty a u hmoty PKM2 bude optimální procento plnění v rozmezí 60 % – 80 %, protože tato hmota byla naopak nízko viskózní. Z výsledků základního zkoušení byla provedena optimalizace, a na základě této optimalizace byly na vybraných recepturách prováděny pokročilé zkoušky, které blíže specifikovaly vlastnosti již vybraných receptur. Nejdůležitějšími doplňkovými pokročilými zkouškami bylo zjištění tepelné odolnosti vyvíjené hmoty stanovením teploty skelného přechodu, stanovení chemické odolnosti a stanovení smrštění vyvíjené hmoty. Dílčím cílem této etapy bylo také prověření vhodnosti použití progresivních nanoplňiv v podobě

uhlíkových nanotrubiček. Vzhledem k obtížnému smísení nanotrubiček s těmito hmotami a jejich vysoké ceně se dospělo k závěru, že nanotrubičky jsou nevhodné pro další použití do těchto kotvících hmot. Výsledky těchto pokročilých zkoušek byly dále optimalizovány v poslední etapě práce.

Závěrečná pátá etapa práce obsahovala optimalizaci receptur vycházejících z výsledků pokročilých laboratorních zkoušek, jejímž výsledkem byly dvě nejlepší hmoty, které byly následně ověřovány poloprovozní zkouškou vytržení. Z optimalizačního výpočtu vyšlo, že výslednou hmotou s nejlepšími parametry byla hmota PKM2 se 70 % obalového skla, která vynikala krátkou dobou tuhnutí, dobrou tepelnou odolností a chemickou odolností, minimálním smrštěním, poměrně vysokými pevnostmi v tlaku a v tahu za ohybu. Jako druhá hmota, která byla použita pro poloprovozní ověření, byla hmota PKM1 s 40 % obalového skla, která vynikala extrémní rychlostí tuhnutí, ale byla velice houževnatá a nebylo možné použít větší množství plniva. Z výsledků vytrhávací zkoušky bylo zjištěno, že požadavek na minimální kotvící sílu 75 kN s posunutím  $\leq 0,6$  mm splnila pouze hmota PKM2 se 70 % obalového skla. Posledním bodem této etapy a zároveň celé práce bylo porovnání vlastností vyvinuté kotvící hmoty PKM2 se 70 % obalového skla s hmotami dnes běžně dostupnými na trhu. Pro závěrečné srovnání byly vybrány čtyři komerční kotvící hmoty na epoxidové bázi a porovnávanými parametry byly především maximální tahová síla, počátek tuhnutí a doba plného vytvrzení. Celkově bylo zjištěno, že nově vyvinutá kotvící hmota PKM2 s obsahem 70 % odpadního obalového skla má některé vlastnosti přibližně stejné nebo dokonce ještě lepší než dosavadní komerční hmoty a zároveň splňuje požadavky dané normou ČSN EN 1504-6 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 6: Kotvení výztužných ocelových prutů.

Na závěr se dá říct, že vyvinutá kotvící hmota PKM2 se 70 % obalového skla frakce 0 – 0,63 mm vyniká krátkou dobou tuhnutí přibližně 30 minut, minimálním smrštěním, které činí přibližně 0,6 mm na 1m, dále poměrně vysokou teplotou skelného přechodu, která je 104,3 °C, dále dobrou chemickou odolností vůči zásadám a slabým anorganickým kyselinám, dále vysokou pevností v tlaku 70,4 MPa a pevností v tahu za ohybu 25,8 MPa, pevností v tahu 10,2 MPa s odpovídajícím prodloužením 0,06 % a v neposlední řadě vysokou silou při vytržení, která je větší než 75 kN s odpovídajícím posunutím 0,56 mm. Tato hmota bude velkým přínosem do praxe a především bude mít příznivý dopad na finanční náročnost a ekologické aspekty, protože se podařilo co nejvíce nahradit drahou pojivovou složku hmoty velkým

množstvím v současnosti velice dostupným druhotným plnivem a zlepšit dokonce i některé vlastnosti kotvící hmoty.

Závěrem lze ještě dodat, že tato diplomová práce byla zpracována v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I" a projektu "TA04010425 – Komplexní systém speciálních správkových hmot s využitím druhotných surovin pro průmyslové provozy" podporovaného Technologickou agenturou ČR.

## 7 SEZNAMY

### 7.1 Seznam použité literatury

- [1] ŽLEBEK, Tomáš. *Výzkum a vývoj zálivkových a kotvících hmot*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA.
- [2] EMMONS, Peter H., DROCHYTKA, Rostislav a JEŘÁBEK, Zdeněk. *Sanace a údržba betonu v ilustracích*, Část 3: Opravy povrchů, Oddíl 3: Volba materiálů, str. 168. Brno, leden 1999. CERM Akademické nakladatelství, s.r.o.
- [3] DROCHYTKA, Rostislav. *Plastické látky*. Modul 01 Plastické látky. Brno, 2007.
- [4] Den Braven. Chemická kotva polyester. *Technický list 07.52a* [online]. Květen 2016. [cit. 8. 11. 2016]. Dostupné z: <http://www.denbraven.cz/dokument-produkt/17/tl-07-52a-rev10-chemicka-kotva-polyester-rl.pdf>
- [5] CEYS. Chemická kotva polyester. *Technický list* [online]. Červen 2016. [cit. 28. 10. 2016]. Dostupné z: [http://www.ceys.cz/kotvy/tl/tl\\_kotva\\_2.pdf](http://www.ceys.cz/kotvy/tl/tl_kotva_2.pdf)
- [6] GUTTA ČR – Praha spol s.r.o. Chemická kotva Polyester – Vinylester. *Technický list* [online]. [cit. 12. 6. 2016]. Dostupné z: <http://www.levnestavebniny.cz/data/upload/ke-stazeni/tl-chemicke-kotvy.pdf>
- [7] MENŠÍK, Martin. *Vliv aditiv na vlastnost epoxidových pryskyřic*. Bakalářská práce. Zlín 2008. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Ústav inženýrství polymerů. Vedoucí práce doc. Ing. Antonín Blaha, CSc.
- [8] Sika CZ, s.r.o. Anchorfix 3<sup>+</sup>. *Technický list* [online]. Březen 2009. [cit. 31. 10. 2016]. Dostupné z: [http://www.obchodprodilnu.cz/download/sprava\\_produkty\\_produkty\\_cs/1427051233\\_cs\\_sika-anchorfix-3-plus.pdf](http://www.obchodprodilnu.cz/download/sprava_produkty_produkty_cs/1427051233_cs_sika-anchorfix-3-plus.pdf)
- [9] Fischer. Injektážní systém FIX EM. *Technický list* [online]. [cit. 8. 11. 2016]. Dostupné z: <http://www.metalfix.cz/files/data/fis%20em/fis%20em.pdf>
- [10] Den Braven a.s. Chemická kotva bez styrénu Vinylester SF. *Technický list 07.51* [online]. Září 2015. [cit. 28. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.denbraven.cz/dokument-produkt/19/sk-tl-07-51-rev8-chemicka-kotva-vinylester-sf-rl.pdf>
- [11] Mungo AG. Chemická kotva epoxy - akrylát. *European Technical Approval ETA 06/0093* [online]. Květen 2013. [cit. 8. 11. 2016]. Dostupné z: [file:///C:/Users/Radek/Downloads/EN\\_ETA-06-0093\\_MVA.pdf](file:///C:/Users/Radek/Downloads/EN_ETA-06-0093_MVA.pdf)

- [12] PCI Barafix 920. *Technický list 425* [online]. Únor 2015. [cit. 9. 11.2016]. Dostupné z: [file:///C:/Users/Radek/Downloads/PCI%20Barrafix\\_920\\_cz%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Radek/Downloads/PCI%20Barrafix_920_cz%20(1).pdf)
- [13] Chejn s.r.o. Směsi křemičitých písků ISG. *Technický list* [online]. [cit. 10. 5. 2016]. Dostupné z: [http://www.chejn.cz/pdf/2\\_isg.pdf](http://www.chejn.cz/pdf/2_isg.pdf)
- [14] VANÍČEK, Štěpán. *Mechanická a chemická povrchová odolnost polymerních materiálů, zkoušení a možnosti zlepšení jejich vlastností*. Brno 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Vít Petránek , Ph.D.
- [15] SVOBODA, Luboš a kol. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jaga group, s.r.o., 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [16] FRÝZOVÁ, Radka. *Fázové složení elektrárenských popílků: kvantitativní stanovení vybraných minerálů*. Brno, 2012. Rešerše k tématu diplomové práce. Masarykova univerzita. Přírodovědecká fakulta. Ústav geologických věd. Vedoucí práce RNDr. Václav Vávra, PhD.
- [17] ROUSEKOVÁ, Ildikó a kol. *Stavební materiály*. Bratislava: Jaga group, v.o.s., 2000. ISBN 80-88905-21-4.
- [18] Nanoscience Instruments. *CNT technology overview* [online]. [cit. 2. 11. 2016]. Dostupné z: <http://www.nanoscience.com/applications/education/overview/cnt-technology-overview/>
- [19] KOUTNÁ, Martina. *Uhlíkové nanotrubičky (CNT) a jejich aplikační možnosti*. Zlín, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Tomáš Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Ústav inženýrství polymerů. Vedoucí práce Ing. Barbora Šafaříková.
- [20] TAHERI-BEHROOZ, Fathollah, ESMKHANI, Masood, YAGHOOBI-CHATROODI, Afsaneh a GHOREISHI, Seyyed M. Elsevier 2016. Polymer testing. *Out-of-plane shear properties of glass/epoxy composites enhanced with carbon-nanofibers* [online]. Elsevier. Pages 278 – 286. [cit. 9. 11. 2016]. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: [http://ac.els-cdn.com/S0142941816307474/1-s2.0-S0142941816307474-main.pdf?\\_tid=9eba3866-a5d9-11e6-bf76-00000aacb35f&acdnat=1478626657\\_d958339842ee8c299f28aba75f6315ae](http://ac.els-cdn.com/S0142941816307474/1-s2.0-S0142941816307474-main.pdf?_tid=9eba3866-a5d9-11e6-bf76-00000aacb35f&acdnat=1478626657_d958339842ee8c299f28aba75f6315ae)
- [21] ČSN EN 1504 – 6. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 6: Kotvení výztužných ocelových prutů*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [22] Kavalierglass a.s. *Sklovina Simax* [online]. [cit. 9. 8. 2016]. Dostupné z: <http://www.kavalier.cz/cz/sekce/41-sklovina-simax.html>

- [23] BECHNÍK, Bronislav. *Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti* [online]. Poslední změna 26. 9. 2011. [cit. 10. 11. 2016]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaickych-panelu-na-konci-zivotnosti>
- [24] MALÍŠKOVÁ, Marie. *Kvalita obalového skla*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Agronomická fakulta. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Štencl, DrSc.
- [25] MOHAMMAD, Irshidat R., MOHAMMED, Al-Saleh H., MAHMOUD, Al-Shoubaki, 2015. Using carbon nanotubes to improve strengthening efficiency of carbon fiber/epoxy composites confined RC columns. *Composite structures*. [online]. Elsevier. Pages 523 – 532. [cit. 29. 10. 2016]. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.108>
- [26] HODNÁ, Jana. *Výzkum a vývoj progresivních ochranných prostředků na vodorovné konstrukce s využitím odpadních surovin*. Brno 2016. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA.
- [27] Cooke, H. G., MC WHORTER, W. F., STROHSCHER, A. R., 1964. Industrial and engineering chemistry. *Chemical resistance of epoxy resins*. [online]. Pages 38 – 41. [cit. 10. 12. 2016]. Dostupné prostřednictvím ACS publications z: doi: 10.1021/ie50653a005.
- [28] BRUNNEROVÁ, Petra. *Fosfazenové sloučeniny pro modifikaci procesů síťování epoxidových pryskyřic*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Masarykova univerzita. Fakulta přírodovědecká. Ústav chemie. Vedoucí práce RNDr. Milan Alberti, CSc.
- [29] Epoxy technology. Tech Tip 23. *Tg – Glass Transition Temperature for Epoxies*. [online]. 2012. [cit. 4. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.epotek.com/site/files/Techtips/pdfs/tip23.pdf>
- [30] BARNAT, Jan. *Analýza chování ocelových lepených kotev*. Brno 2010. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav kovových a dřevěných konstrukcí.
- [31] Hilti ČR, spol. S.r.o. Hilti HIT-RE 500-SD. *Technický list* [online]. Září 2014. [cit. 12. 12. 2016]. Dostupné z: [https://www.hilti.cz/medias/sys\\_master/documents/h63/9158878396446/Postinstalled\\_rebar\\_connections\\_Technical\\_information\\_ASSET\\_DOC\\_LOC\\_5018489.pdf](https://www.hilti.cz/medias/sys_master/documents/h63/9158878396446/Postinstalled_rebar_connections_Technical_information_ASSET_DOC_LOC_5018489.pdf)
- [32] Mungo AG. Chemická kotva MIT600RE. *European Technical Approval ETA 09/0340* [online]. Říjen 2009. [cit. 12. 12. 2016]. Dostupné z: [http://www.obchodprodilnu.cz/download/sprava\\_produkty\\_produkty\\_cs/1428914547\\_cs\\_7694\\_eta-mit600re.pdf](http://www.obchodprodilnu.cz/download/sprava_produkty_produkty_cs/1428914547_cs_7694_eta-mit600re.pdf)
- [33] Fischer s.r.o. Injektážní systém FIS EM. *Technický list* [online]. [cit. 12. 12. 2016]. Dostupné z: <http://www.metalfix.cz/files/data/fis%20em/fis%20em.pdf>

## 7.2 Seznam použitých zkratk

EP – epoxidové pryskyřice  
 UP – nenasycené polyesterové pryskyřice  
 VES – vinylesterové pryskyřice  
 PU – polyuretanové pryskyřice  
 PKM1 – polymerní kotvící materiál 1  
 PKM2 – polymerní kotvící materiál 2  
 PKM3 – polymerní kotvící materiál 3  
 REF – referenční  
 EPC - epichlorhydrin  
 BPA – bisfenol A  
 CNT – uhlíkové nanotrubičky  
 SWCNT – jednovrstvé uhlíkové nanotrubičky  
 MWCNT – vícevrstvé uhlíkové nanotrubičky  
 DSC – Diferenční skenovací kalorimetrie

## 7.3 Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – Vlastnosti nejpoužívanějších kotvících hmot .....	25
Tabulka č. 2 – Průměrné chemické složení skleněných vloček .....	26
Tabulka č. 3 – Průměrné chemické složení sklářského písku .....	26
Tabulka č. 4 – Průměrné chemické složení vysokoteplotních popílků .....	27
Tabulka č. 5 – Průměrné chemické složení fluidních popílků .....	28
Tabulka č. 6 – Průměrné chemické složení strusky .....	28
Tabulka č. 7 – Průměrné chemické složení Balotiny .....	29
Tabulka č. 8 – Průměrné chemické složení skla NaSX .....	29
Tabulka č. 9 – Průměrné chemické složení odpadního skla ze skelné vaty .....	29
Tabulka č. 10 – Průměrné chemické složení křemičitého písku Dorsilit .....	39
Tabulka č. 11 – Průměrné chemické složení autoskla .....	40
Tabulka č. 12 – Průměrné chemické složení skla ze solárních panelů typu QS solar .....	42
Tabulka č. 13 – Průměrné chemické složení obalového skla .....	43
Tabulka č. 14 – Hodnotící systém pro zrychlenou zkoušku chemické odolnosti navržen s ohledem na dosažené výsledky vyvíjených kotvících hmot .....	53



Tabulka č. 15 – Hodnocení sedimentace .....	54
Tabulka č. 16 – Výsledné průměrné hodnoty pevností a objemové hmotnosti .....	56
Tabulka č. 17 – Tabulka výsledných hodnot objemových hmotností a pevností .....	60
Tabulka č. 18 – Výsledné hodnoty objemových hmotností a pevností v tahu za ohybu a v tlaku hmoty PKM2 .....	66
Tabulka č. 19 – Výsledné hodnoty objemových hmotností a pevností v tahu za ohybu a v tlaku hmoty PKM3 .....	66
Tabulka č. 20 – Výsledné hodnoty zkoušených hmot u zvolených kritérií .....	70
Tabulka č. 21 – Výpočet váhy – Sattiho matice .....	70
Tabulka č. 22 – Výpočtová matice .....	71
Tabulka č. 23 – Výsledné hodnoty zkoušených hmot u zvolených kritérií .....	72
Tabulka č. 24 – Výpočet váhy – Sattiho matice .....	72
Tabulka č. 25 – Výpočtová matice .....	72
Tabulka č. 26 – Časy výtoků hmot v závislosti na druhu hmoty a množství plniva .....	73
Tabulka č. 27 – Výsledné tahové vlastnosti zkoušených hmot .....	77
Tabulka č. 28 – Výsledné tahové vlastnosti zkoušených hmot .....	80
Tabulka č. 29 – Tabulka hodnocení chemické odolnosti hmoty PKM1 .....	88
Tabulka č. 30 – Tabulka hodnocení chemické odolnosti hmoty PKM2 .....	88
Tabulka č. 31 – Vyhodnocení výsledných vlastností .....	93
Tabulka č. 32 – Výsledné hodnoty modulu pružnosti v ohybu .....	95
Tabulka č. 33 – Tabulka zjištěných teplot skelného přechodu posuzovaných hmot .....	95
Tabulka č. 34 – Výsledné hodnoty zkoušených hmot u zvolených kritérií .....	97
Tabulka č. 35 – Výpočet váhy – Sattiho matice .....	97
Tabulka č. 36 – Výpočtová matice .....	97
Tabulka č. 37 – Výsledné hodnoty maximálních sil při vytržení a odpovídající posunutí .....	101
Tabulka č. 38 – Srovnání vyvinuté kotevní hmoty s komerčními hmotami .....	104

## 7.4 Seznam vzorců

(1) Vzorec pro výpočet největší pevnosti v tahu .....	52
(2) Vzorec pro výpočet poměrného prodloužení při nejvyšší pevnosti .....	52
(3) Vzorec pro výpočet poměrného prodloužení při přetržení .....	52
(4) – (5) Vzorce pro výpočet deformace ohybem .....	53
(6) Vzorec pro výpočet stlačení v lineární části .....	53

(7) – (8) Vzorce pro výpočet napětí v ohybu .....	53
(9) Vzorec pro výpočet krátkodobého modulu pružnosti v ohybu .....	53
(10) Vzorec pro výpočet matice $S_{ij}$ .....	70
(11) Vzorec pro optimalizační mezivýpočet .....	70
(12) Vzorec pro výpočet vah kritérií .....	70
(13) Vzorec pro výpočet hledané maximální hodnoty .....	71
(14) Vzorec pro výpočet hledané minimální hodnoty .....	71
(15) Vzorec pro výpočet výsledné hodnoty do výpočtové matice .....	71
(16) – (17) Výpočet koncentrace křížovým pravidlem .....	84
(18) – (19) Výpočet deformace ohybem .....	94
(20) Výpočet stlačení v lineární části .....	94
(21) – (22) Výpočet napětí v ohybu .....	94
(23) Výpočet krátkodobého modulu pružnosti v ohybu .....	94

## 7.5 Seznam obrázků

Obr. č. 1 – Křemičitý písek Dorsilit 40 .....	
Obr. č. 2 – Distribuční křivka písku Dorsilit frakce 0–0,63 mm .....	40
Obr. č. 3 – Distribuční křivka autoskla frakce 0–0,63 mm .....	41
Obr. č. 4 – Autosklo frakce 0–0,63 mm .....	41
Obr. č. 5 – Autosklo .....	41
Obr. č. 6 – Jemně mleté autosklo frakce $\leq 0,063$ mm .....	41
Obr. č. 7 – Laboratorní sklo .....	42
Obr. č. 8 – Jemně mleté sklo Simax frakce $\leq 0,063$ mm .....	42
Obr. č. 9 – Distribuční křivka skla QS solar frakce 0–0,63 mm .....	43
Obr. č. 10 – Sklo ze solárních panelů .....	43
Obr. č. 11 – Jemně mleté sklo QS solar frakce 0–0,63 mm .....	43
Obr. č. 12 – Distribuční křivka obalového skla frakce 0–0,63 mm .....	44
Obr. č. 13 – Obalové sklo .....	44
Obr. č. 14 – Jemně mleté obalové sklo bílé frakce 0–0,63 mm .....	44
Obr. č. 15 – Odpadní slévárenský písek .....	44
Obr. č. 16 – Distribuční křivka slévárenského písku frakce 0–0,63 mm .....	44
Obr. č. 17 – Uhlíkové nanotrubičky SWCNT A MWCNT .....	45
Obr. č. 18 – Uhlíkové nanotrubičky SWCNT .....	45

Obr. č. 19 – Tensograf TGF 02 .....	52
Obr. č. 20 – Zařízení pro vytrhávací zkoušku .....	54
Obr. č. 21 – PKM1 + 10 % Simax frakce $\leq 0,063$ mm .....	55
Obr. č. 22 – PKM1 + 50 % Simax frakce $\leq 0,063$ mm .....	55
Obr. č. 23 – PKM1 + 10 % autosklo frakce $\leq 0,063$ mm .....	56
Obr. č. 24 – PKM1 + 50 % autosklo frakce $\leq 0,063$ mm .....	56
Obr. č. 25 – Vzorek po zkoušce pevnosti v tlaku .....	56
Obr. č. 26 – Vzorek při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu .....	56
Obr. č. 27 – Graf závislosti objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu na procentu plnění .....	57
Obr. č. 28 – Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na procentu plnění .....	57
Obr. č. 29 – Graf závislosti pevnosti v tlaku na procentu plnění .....	57
Obr. č. 30 – PKM1 + 40 % Dorsilit .....	58
Obr. č. 31 – PKM1 + 60 % Dorsilit .....	58
Obr. č. 32 – PKM1 + 40 % QS solar .....	59
Obr. č. 33 – PKM1 + 60 % QS solar .....	59
Obr. č. 34 – PKM1 + 40 % Obal. sklo .....	59
Obr. č. 35 – PKM1 + 60 % Obal. sklo .....	59
Obr. č. 36 – PKM1 + 40 % autosklo .....	59
Obr. č. 37 – PKM1 + 60 % autosklo .....	59
Obr. č. 38 – Ref. Hmota PKM1 .....	59
Obr. č. 39 – PKM1 + 40 % Slév. písek .....	59
Obr. č. 40 – PKM1 + 60 % Slév. písek .....	59
Obr. č. 41 – Průběh zkoušky pevnosti v tahu za ohybu .....	59
Obr. č. 42 – Vzorek po zkoušce pevnosti v tlaku .....	59
Obr. č. 43 – Graf zobrazující měnící se objemové hmotnosti v čerstvém stavu v závislosti na druhu a procentu plnění .....	61
Obr. č. 44 – Graf zobrazující měnící se objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu v závislosti na druhu a procentu plnění .....	61
Obr. č. 45 – Graf zobrazující měnící se pevnosti v tahu za ohybu v závislosti na druhu a procentu plnění .....	62
Obr. č. 46 – Graf zobrazující měnící se pevnosti v tlaku v závislosti na druhu a procentu plnění .....	62
Obr. č. 47 – PKM2 + 50 % – 80 % obalového skla .....	63

Obr. č. 48 – PKM2 + 50 % – 80 % Dorsilit .....	63
Obr. č. 49 – PKM2 referenční neplněná .....	64
Obr. č. 50 – PKM2 + 60 % autosklo .....	64
Obr. č. 51 – PKM3 + 50 % autosklo .....	64
Obr. č. 52 – Vzorky po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu .....	64
Obr. č. 53 – PKM3 + 70 % autosklo .....	65
Obr. č. 54 – PKM3 + 75 % autosklo .....	65
Obr. č. 55 – PKM3 + 70 % Dorsilit .....	65
Obr. č. 56 – PKM3 + 40 % obalové sklo .....	65
Obr. č. 57 – PKM3 + 70 % obalové sklo .....	65
Obr. č. 58 – PKM3 – vysoká přilnavost k silikonu .....	65
Obr. č. 59 – Vzorek před zkouškou pevnosti v tlaku .....	65
Obr. č. 60 – Vzorek po zkoušce pevnosti v tlaku .....	65
Obr. č. 61 – Graf závislosti objemové hmotnosti v čerstvém stavu na druhu hmoty a různém procentu plnění a druhu plniva .....	67
Obr. č. 62 – Graf závislosti objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu na druhu hmoty a různém procentu plnění a druhu plniva .....	67
Obr. č. 63 – Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na druhu hmoty a různém procentu plnění a druhu plniva .....	68
Obr. č. 64 – Graf závislosti pevnosti v tlaku na druhu hmoty a různém procentu plnění a druhu plniva .....	68
Obr. č. 65 – Složka A .....	73
Obr. č. 66 – Složka A + plnivo .....	73
Obr. č. 67 – PKM2 + 70 % obalové sklo .....	73
Obr. č. 68 – PKM2 + 70 % Dorsilit .....	74
Obr. č. 69 – PKM2 se 70 % obalového skla .....	74
Obr. č. 70 – Oboustranné lopatky – autosklo .....	75
Obr. č. 71 – Oboustranné lopatky – obalové sklo .....	75
Obr. č. 72 – Oboustranné lopatky – písek Dorsilit .....	75
Obr. č. 73 – Oboustranné lopatky – QS solar .....	75
Obr. č. 74 – Počátek zkoušky .....	75
Obr. č. 75 – Průběh zkoušky .....	75
Obr. č. 76 – Konec zkoušky .....	75

Obr. č. 77 – Pracovní diagram zkušebních těles PKM1 30 % QS solar .....	76
Obr. č. 78 – Pracovní diagram zkušebních těles PKM1 50 % Dorsilit .....	76
Obr. č. 79 – Graf závislosti největší pevnosti v tahu na druhu a množství plniva .....	77
Obr. č. 80 – Graf závislosti pevnosti v tahu při přetržení na druhu a množství plniva .....	78
Obr. č. 81 – Graf závislosti poměrného prodloužení při největší pevnosti na druhu a množství plniva .....	78
Obr. č. 82 – Graf závislosti poměrného prodloužení při přetržení na druhu a množství plniva .....	79
Obr. č. 83 – PKM2 + 70 % obalové sklo .....	80
Obr. č. 84 – PKM2 + 70 % Dorsilit .....	80
Obr. č. 85 – Graf závislosti největší pevnosti v tahu na druhu a množství plniva .....	80
Obr. č. 86 – Sedimentace hmot na počátku zkoušky .....	82
Obr. č. 87 – Sedimentace hmot na počátku zkoušky .....	82
Obr. č. 88 – Sedimentace hmot po 110 dnech .....	82
Obr. č. 89 – Sedimentace hmot po 110 dnech .....	82
Obr. č. 90 – Sedimentace hmot na počátku zkoušky .....	83
Obr. č. 91 – Sedimentace hmot po 1 dni .....	83
Obr. č. 92 – Sedimentace hmot po dvou dnech .....	83
Obr. č. 93 – Sedimentace hmot po 14 dnech .....	83
Obr. č. 94 – Vzorky hmot před uložením do agresivních kapalných roztoků .....	85
Obr. č. 95 – Vzorky hmot před uložením do agresivních kapalných roztoků .....	85
Obr. č. 96 – Vzorky hmot před uložením do agresivních kapalných roztoků .....	85
Obr. č. 97 – Vzorky hmot před uložením do agresivních kapalných roztoků .....	85
Obr. č. 98 – Uložení vzorků do jednotlivých agresivních kapalných roztoků .....	85
Obr. č. 99 – Vzorky po vytažení z 40% NaOH .....	85
Obr. č. 100 – Vzorky po vytažení z 40% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	85
Obr. č. 101 – Vzorky po vytažení z 10% NaCl .....	86
Obr. č. 102 – Vzorky po vytažení z 20% CH <sub>3</sub> COOH .....	86
Obr. č. 103 – Vzorky po vytažení z 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	86
Obr. č. 104 – Vzorky po vytažení z benzínu .....	86
Obr. č. 105 – Vzorky po vytažení z destilované vody .....	86
Obr. č. 106 – Vzorky po vytažení z piva .....	86
Obr. č. 107 – Vzorky po vytažení z 40% NaOH .....	87

Obr. č. 108 – Vzorky po vytažení z 10% NaCl .....	87
Obr. č. 109 – Vzorky po vytažení z 20% CH <sub>3</sub> COOH .....	87
Obr. č. 110 – Vzorky po vytažení z 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	87
Obr. č. 111 – Vzorky po vytažení z destilované vody .....	87
Obr. č. 112 – Vzorky po vytažení z benzínu .....	87
Obr. č. 113 – Vzorky po vytažení z piva .....	87
Obr. č. 114 – Vzorky po vytažení z 40% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	87
Obr. č. 115 – Graf průběhu teplot během polymerizace .....	89
Obr. č. 116 – Termočlánekový teploměr Comet .....	90
Obr. č. 117 – Tensograf TGF 02 .....	90
Obr. č. 118 – Hmota PKM1 + 40 % obal. sklo v Tensografu .....	90
Obr. č. 119 – Graf zobrazující průběh napětí ve hmotě PKM1 v závislosti na čase .....	91
Obr. č. 120 – Graf zobrazující průběh napětí ve hmotě PKM1 + 40 % obalové sklo v závislosti na čase .....	91
Obr. č. 121 – Graf zobrazující průběh napětí ve hmotě PKM2 + 70 % obalové sklo v závislosti na čase .....	92
Obr. č. 122 – Uhlíkové nanotrubičky .....	92
Obr. č. 123 – Uhlíkové nanotrubičky před zamícháním .....	92
Obr. č. 124 – Uhlíkové nanotrubičky po zamíchání .....	93
Obr. č. 125 – Hmota PKM1 + 40 % obal. + nanotrub. ....	93
Obr. č. 126 – Vzorek po zk. zatěžování třibod. ohybem .....	93
Obr. č. 127 – Vzorek PKM1 Ref při zkoušce zatěžování .....	93
Obr. č. 128 – Pracovní diagram obrazující závislost působící síly na stlačení .....	94
Obr. č. 129 – Příprava betonových bloků pro následné kotvení .....	98
Obr. č. 130 – Příprava betonových bloků pro následné kotvení .....	98
Obr. č. 131 – Vrtání otvorů .....	99
Obr. č. 132 – Vrtání otvorů .....	99
Obr. č. 133 – Zakotvení závitových tyčí .....	99
Obr. č. 134 – Sestavování zařízení .....	99
Obr. č. 135 – Vytrhávací zařízení .....	99
Obr. č. 136 – Provádění zkoušky .....	99
Obr. č. 137 – Kotvy po zkoušce vytržení .....	99
Obr. č. 138 – Kotva PKM1 bez plniva po vytažení z betonu.....	100

Obr. č. 139 – PKM3 + 40 % obal. sklo – povytažení z hmoty .....	100
Obr. č. 140 – PKM3 + 70 % obalové sklo .....	100
Obr. č. 141 – Utržení ocelové závitové tyče – hmota PKM + 70 % obalové sklo .....	100
Obr. č. 142 – Utržení ocelové závitové tyče – hmota PKM + 70 % obalové sklo .....	100
Obr. č. 143 – Graf závislosti vytrhávající síly na posunutí u referenční hmoty .....	101
Obr. č. 144 – Graf závislosti vytrhávající síly na posunutí hmoty PKM1 se 40 % obalového skla .....	101
Obr. č. 145 – Graf závislosti vytrhávající síly na posunutí hmoty PKM1 se 40 % QS solaru .....	102
Obr. č. 146 – Graf závislosti vytrhávající síly na posunutí hmoty PKM2 se 70 % obalového skla .....	102
Obr. č. 147 – Graf závislosti vytrhávající síly na posunutí hmoty PKM3 se 40 % obalového skla .....	102
Obr. č. 148 – Graf závislosti vytrhávající síly na posunutí hmoty PKM3 se 70 % obalového skla .....	103